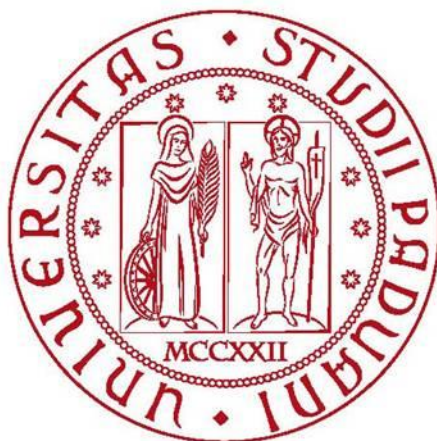


UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

STUDENTE: DITMIR NDOKA

MATRICOLA:1182713

RELATORE: PROF. RENATO GOBBO

ANNO ACCADEMICO:2019/2020

TITOLO TESI:

**TECNOLOGIA E MERCATO ATTUALE
DEGLI STRUMENTI DI MISURA E MONITORAGGIO
DELLE SCARICHE PARZIALI**

1. INTRODUZIONE	
1. CAPITOLO 1: SCARICHE PARZIALI	1
1.1 IL FENOMENO DELLE SCARICHE PARZIALI	1
1.1.1 TREEING ELETTRICO:	1
1.1.2 SCARICA PARZIALE PER EFFETTO CORONA:	4
1.2 TIPOLOGIE DI SCARICHE PARZIALI NEGLI ISOLANTI ELETTRICI	7
1.2.1 SCARICHE PARZIALI NEGLI ISOLANTI SOLIDI:	7
1.2.2 SCARICHE PARZIALI NEGLI ISOLANTI IN GAS:	11
1.2.3 SCARICHE PARZIALI NEGLI ISOLANTI LIQUIDI:	13
2. CAPITOLO 2: MISURE E MONITORAGGIO DELLE P.D	14
2.1 MISURE SU SCARICHE PARZIALI:	14
2.1.1 GRANDEZZE MISURISTICHE DELLE SCARICHE PARZIALI:	14
2.2 MONITORAGGIO DELLE P.D	20
3. CAPITOLO 3: TECNOLOGIA STRUMENTALE:	24
3.1 METODI DI MISURAZIONE ELETTRICHE DELLE SCARICHE PARZIALI	24
3.2 TECNICHE ACUSTICHE PER IL RILEVAMENTO DELLE SCARICHE PARZIALI	31
3.2.1 PARAMETRI ACUSTICI:	32
3.2.2 SENSORI AD EMISSIONE ACUSTICA:	33
3.2.3 COMPOSIZIONE DI UN SISTEMA AE:	34
3.2.4 CALIBRAZIONE DEL SISTEMA AE:	36
3.2.5 PROCESSO DI PROPAGAZIONE DEL SEGNALE ACUSTICO:	37
3.2.6 LOCALIZZAZIONE DELLE SCARICHE PARZIALI:	37
3.2.7 CONFRONTO TRA METODI ELETTRICI E METODI ACUSTICI:	39
3.2.8 RIPETIBILITA' DEI TEST:	40
3.3 DIAGNOSTICA DELLE SCARICHE PARZIALI NEI TRASFORMATORI, MOTORI e CAVI:	41
3.3.1 MISURE DI SCARICHE PARZIALI NEI TRASFORMATORI e RELATIVE TECNICHE DIAGNOSTICHE:	42
3.3.2 MISURA e DIAGNOSTICA DELLE SCARICHE PARZIALI NELLE MACCHINE ROTANTI:	49
3.3.3 MISURE DELLE SCARICHE PARZIALI NEI CAVI:	56
4. CAPITOLO 4: MERCATO STRUMENTALE	58
4.1 PRINCIPALI COSTRUTTORI	59
4.1 OFFERTE STRUMENTALI	63
5. CONCLUSIONI	112
6. RINGRAZIAMENTI	113

1. INTRODUZIONE

Il contenuto di questa Tesi vuole offrire informazioni su come le scariche parziali, oltre ai metodi di misurazione e monitoraggio utilizzati per identificarne le caratteristiche, vengono tenute conto nella progettazione del sistema di isolamento di un sistema elettrico offrendo una panoramica su come avvengono queste scariche, le loro caratteristiche, le diverse tipologie di scariche parziali e la loro influenza nel sistema stesso.

Il mio elaborato si concentrerà maggiormente sulle modalità di misura e monitoraggio di queste tipologie di fenomeni in corrente alternata ampliando il discorso anche su quello che offre il mercato attuale sugli strumenti utilizzati per le misurazioni stesse.

L'importanza che hanno queste tipologie di misurazioni sulle scariche riguarda non solo la possibilità di avere un'idea dell'ampiezza del loro raggio d'azione ma anche di saper valutare una loro possibile conseguenza sul sistema stesso in seguito ad una scarica.

Il monitoraggio, a differenza delle misure, permette di conoscere istante per istante lo stato del sistema in qualsiasi condizione di funzionamento permettendo di agire in seguito ad una scarica sul sistema.

Prima di iniziare quindi ad esporlo vorrei innanzitutto far capire brevemente cosa si intende per scarica parziale, misura e monitoraggio e perché dell'importanza di queste operazioni.

Una scarica parziale è una scarica che affligge solo una determinata parte del sistema isolante e che può non portare immediatamente alla scarica completa e questi fenomeni possono avvenire in tutti i sistemi isolanti.

Nel caso di materiali organici isolanti l'avvenimento delle scariche parziali porta ad una erosione del materiale a seguito di impulsi ripetitivi di scariche in ambito AC e questo nel tempo può ridurre drasticamente la vita del materiale.

La misura invece è un processo che permette di ottenere informazioni numeriche da una grandezza fisica presa come riferimento di studio esempio la Corrente[A] circolante in un cavo.

Lo scopo delle misure quindi è quello di conoscere le caratteristiche del nostro oggetto di studio, come per esempio il cavo e ricavarne informazioni su alcune grandezze elettriche che ne descrivono il funzionamento in modo tale da poterlo successivamente utilizzare per la messa in esercizio.

Le misure si differenziano in:

-Misure dirette:

sono le misure che si effettuano per confronto tra la grandezza data e un campione dell'unità di misura.

-Misure indirette:

sono quelle in cui la misura di una grandezza fisica viene ricavata tramite operazioni matematiche a partire da misure diverse precedentemente effettuate.

Le misure sono caratterizzate da incertezze ovvero è l'intervallo di valori sui quali può cadere il valore vero del nostro misurando e nel campo delle misure elettriche gli strumenti vengono caratterizzati dalle incertezze di misura.

Per monitoraggio si intende invece tutte le tecniche utilizzate per tenere sotto controllo una determinata macchina oppure un intero sistema istante per istante misurandone le grandezze caratteristiche stesse del soggetto in considerazione.

Il monitoraggio, in differenti ambiti, è importante perché permette di valutare istante per istante lo stato di salute di un sistema e il monitoraggio si differenzia in:

-Monitoraggio continuo:

Si effettua con uno strumento che rileva senza soluzione di continuità un segnale / valore, tracciando, su carta, su mezzo magnetico o simile, l'andamento di una determinata variabile posta sotto controllo.

-Monitoraggio ad alta frequenza:

Si parla di monitoraggio anche quando la rilevazione non è esattamente continua, ma a frequenza sufficientemente alta rispetto al processo monitorato, tale da rendere significative e tempestive le eventuali correzioni al processo stesso.

-Monitoraggio a media frequenza:

È quello tipico delle rilevazioni statistiche continue, sul territorio, sull'ambiente, sulla popolazione, sul mercato, condotto o da Enti a carattere Istituzionale o Società di provata e riconosciuta serietà operativa.

Per quanto riguarda il campo delle Scariche Parziali l'importanza che hanno sia le misure che il monitoraggio riguarda la possibilità di poter valutare la qualità del sistema isolante in seguito a possibili impulsi generati da questi tipi di fenomeni.

1 CAPITOLO 1: SCARICHE PARZIALI

1.1 IL FENOMENO DELLE SCARICHE PARZIALI

La Scarica Parziale è una tipologia di scarica che interessa solo una parte del dielettrico tra due conduttori senza comportare una scarica completa quindi prende in considerazione una zona locale dell'isolamento e si verifica negli isolanti solidi, liquidi e isolanti in gas.

La presenza di forme geometriche appuntite attorno ai conduttori possono far scaturire la nascita della scarica quindi la progettazione delle apparecchiature e il processo di produzione devono cercare di ridurre il più possibile l'avvio delle scariche.

Le diverse condizioni per il quale può nascere la scarica parziale possono essere riassunte così:

- i) Presenza di regioni altamente conduttive.
- ii) Difetti locali, forma, natura nella matrice dell'isolante.

Dipendendo dai difetti locali e dalla geometria degli elettrodi le scariche parziali si suddividono in:

- a) scariche interne: si verificano nei difetti contenuti all'interno dell'isolante.
- b) scariche superficiali: si verificano lungo la superficie del materiale isolante.
- c) scariche corona: dovute ad elevata concentrazione di forte sollecitazione con bordo affilato dell'elettrodo.

La presenza dei difetti può far nascere una scarica all'interno del materiale isolante e quando il difetto diventa conduttivo si realizza il fenomeno di scarica del 'Treeing'.

1.1.1 TREEING ELETTRICO:

Il **Treeing** è un processo di scarica che avviene in presenza di difetti di conduzione tra elettrodi.

Nei materiali di tipo estruso o materiali polimerici molto spesso può avvenire il treeing e la sua fase iniziale chiamata innesco avviene dalla punta dell'inizio della fase di conduzione.

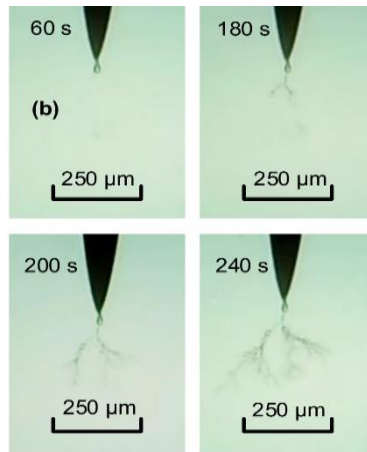


Figura 1.1 Step del Treeing¹

Il treeing può essere essere classificato in base al tipo di processo ovvero:

- treeing elettrico
- treeing elettrochimico
- treeing nell'acqua

I processi del treeing, quando avvengono completamente, causano una rottura rapida del dielettrico in due fasi distinte successiva alla fase di innesco come è dimostrato nella seguente figura:

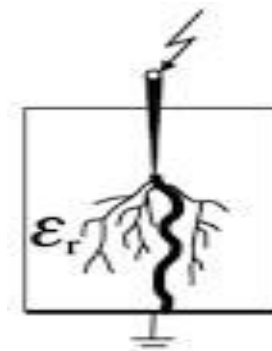


Figura 1.2: Scarica completa del Treeing in un dielettrico²

Il Treeing può verificarsi anche in presenza di difetti conduttivi o pieni di gas nei dielettrici e la fase di innesco è causata da un campo elettrico elevato sulla punta.

Il campo elettrico massimo alternato sulla punta di un difetto acuto in un isolante solido si ricava dalla seguente formula:

$$E_{max} = 2 * \frac{U}{r * \left(\ln \left(1 + 4 * \frac{S}{r} \right) \right)} \quad (1.1)$$

Dove:

- U: tensione elettrica
- r: raggio del conduttore
- S: superficie del materiale

¹ Fonte: Google

² Fonte: Google

Il treeing si suddivide in tre fasi:

- 1) innesco
- 2) propagazione
- 3) terminazione

Il campo elettrico presente sulla punta è molto elevato rispetto al campo elettrico normale a seconda del raggio della punta.

In presenza di tale campo il dielettrico è sottoposto a forze elettrostatiche tali che quando superano le forze meccaniche, necessarie per provocare una crepa, ne consegue il primo canale di guasto meccanico.

La nascita della crepa per effetto della presenza del campo elettrico sulla punta può avvenire in due modi a seconda del tipo di materiale:

i) Negli isolanti organici le forze elettrostatiche generate dal campo E_{max} tendono a dissociare la struttura generando delle particelle di carbone che si depositano sul canale di scarica rendendolo quasi conduttivo ed il crack iniziale si estende così verso direzioni differenti sulla struttura.

ii) Negli isolanti inorganici il crack sulla punta iniziale non si estende immediatamente e quindi il canale di apparizione non diventa conduttivo come sopra. Le teorie che si sono estese per spiegare tale fenomeno hanno suggerito che la scarica parziale inizia proprio da uno dei tre canali di scarica.

Tuttavia nelle teorie proposte ci sono obiezioni a riguardo del fatto che la pressione esercitata dal canale di scarica è molto bassa e quindi le condizioni di innesco della scarica parziale sono molto dubbie.

Prendiamo in considerazione un mezzo isolante con all'interno una cavità gassosa:

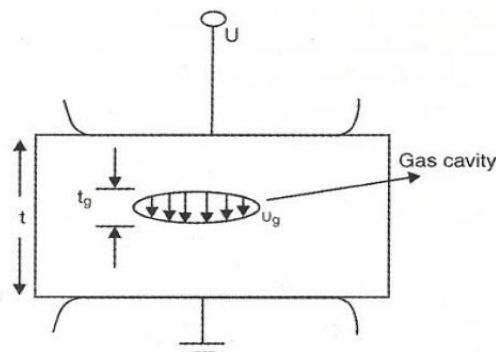


Figura 1.3 Cavità gassosa entro un mezzo isolante³

La tensione presente nella cavità è funzione del campo elettrico locale potenziato ed il suo valore è ricavato dalla formula $E^*(\epsilon_{solid}/\epsilon_{cavity})$.

Aumentando la tensione fino a giungere il valore della tensione U_g la cavità in gas scarica.

U_g corrisponde al valore di tensione corrispondente al minimo della curva di Paschen come mostrato in figura:

³ Fonte: T.S RAMU, H.N NAGAMANI "Partial Discharge based condition monitoring of High Voltage Equipment"

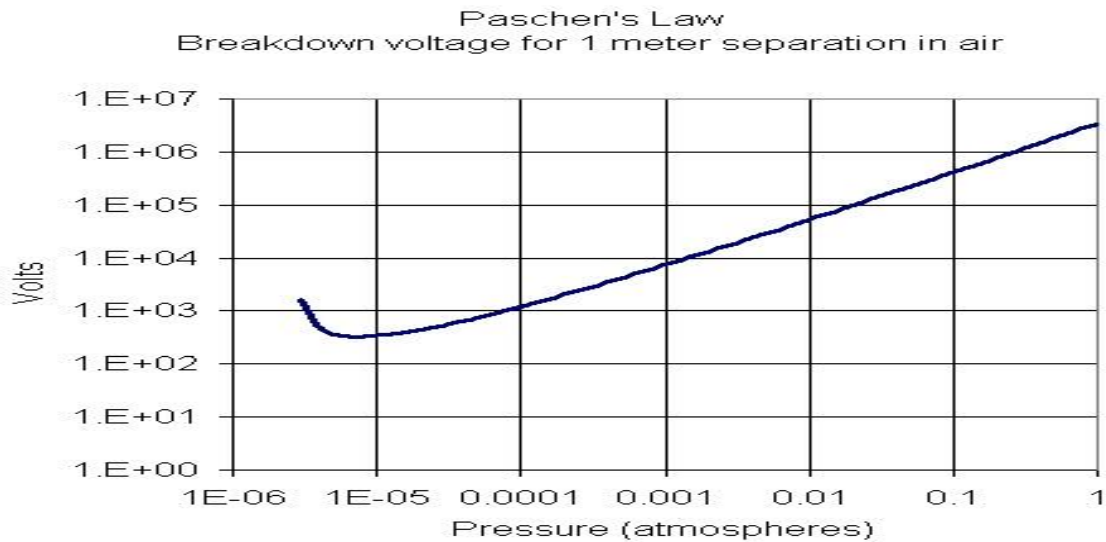


Figura 1.4: Curva di Paschen⁴

La curva di Paschen è una curva che esprime la tensione di innesco di un gas ionizzato in funzione del prodotto della pressione presente nell'involucro e della sua lunghezza.

Dalla curva si può stabilire che il campo di scarica non è solo funzione della tensione U_g e dello spessore t_g ma anche della pressione del gas nella cavità.

1.1.2 SCARICA PARZIALE PER EFFETTO CORONA:

Come già menzionato nei paragrafi precedenti la presenza di difetti negli isolanti o di inclusioni al suo interno possono portare alla nascita di fenomeni di scarica distruttivi.

Il trasferimento di carica all'interno di queste cavità dà origine a un processo di pre-scarica in cui la cavità si rompe elettricamente e la carica racchiusa viene trasferita nell'immediato esterno in direzione del campo elettrico.

Quando una scarica avviene nello spazio libero su cui è presente il conduttore si instaura quella che viene chiamata Scarica Corona.

Per spiegare la scarica parziale derivante da effetto Corona considero un conduttore di raggio r_0 portante una carica Q come rappresentato nella seguente figura:

⁴ Fonte: Google

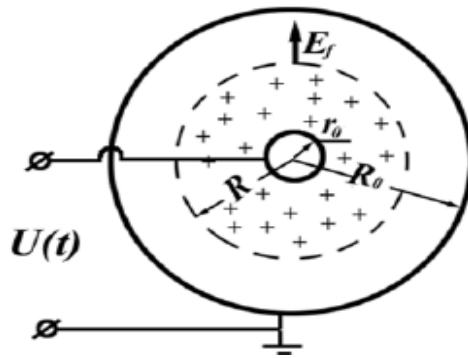


Figura 1.5: Effetto corona su un conduttore⁵

La tensione Ψ attorno alla sfera di raggio R dal centro della sfera nello spazio è uguale a:

$$\Psi = \frac{Q}{4 * \pi * \epsilon_0 * R} \quad (1.2)$$

Mentre il campo elettrico è ottenuto dalla seguente formula:

$$E = \frac{Q}{4 * \pi * \epsilon_0 * R^2} \quad (1.3)$$

Specificando che $4 * \pi * \epsilon_0 * r_0 * U = Q$ l'espressione sopra di E diventa:

$$E = \frac{U * r_0}{R^2} \quad (1.4)$$

Le immediate vicinanze di una sfera carica, dunque, sono sollecitate elettricamente nella misura in cui l'energia risiede in un elemento di volume attorno a quella regione data da $2 * \pi * \epsilon_0 * R * E^2$ [Fonte3].

Se il valore di campo elettrico supera le forze di rottura dello spazio libero la sfera viene soggetta a scarica per effetto Corona.

In un conduttore cilindrico come un'asta conduttrice il campo elettrico alle estremità dell'asta è molto elevato e la regione che circonda le due estremità risulta fortemente sollecitata e causa intense ionizzazioni nel mezzo circostante.

Sono da considerare due aspetti in questo caso:

1) Se le estremità sono taglienti il campo ionizzante risulta compreso tra l'1% e lo 0,5% del campo corrispondente attorno alla sfera del raggio equivalente.

2) La lunghezza del percorso fatto dalla Scarica Corona è molto più lungo comparato a quello nel caso di geometria sferica.

⁵ Fonte: Google

Per quanto riguarda invece altri tipi di conduttori con geometrie diverse la Scarica Corona può essere descritta in maniera simile.

Quando la densità di energia nel mezzo circostante supera il potenziale di ionizzazione avviene la scarica locale sotto forma di suono sibilante e luce abbagliante mentre il calore generato è molto piccolo.

Le differenti tipologie di scariche in base alla configurazione elettrodica sono rappresentate nella seguente figura:

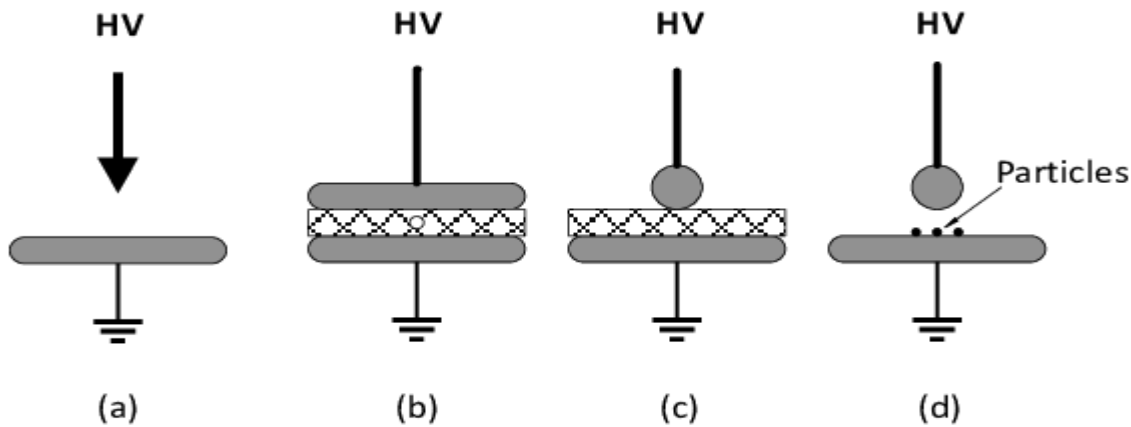


Figura 1.6: a) scarica parziale artificiale, b) scarica corona e parziale in olio, c) in vuoto, d) scarica superficiale in aria⁶

Il termine ‘Parziale’ intende a significare che le scariche non coprono lo spessore dell’isolamento e prima della comparsa della PD la parete della cavità forma un’interfaccia con il dielettrico.

Le cariche interfacciali completano il campo potenziato dovuto alla cavità. Se la tensione presente nella cavità dovuto alla presenza di tale campo supera il minimo della curva di Paschen, si verifica la scarica mediante la quale le cariche nella cavità vengono neutralizzate.

Il processo di neutralizzazione genera una scarica locale elettrica appunto la scarica parziale.

Il tempo di innesco per la scarica è molto piccolo ($\ll 1\mu s$) ed il processo rilascia una quantità di energia considerevole nell’isolante tale da degradare l’isolante stesso [Fonte 3].



[Fonte: Google]

⁶ Fonte: Google

1.2 TIPOLOGIE DI SCARICHE PARZIALI NEGLI ISOLANTI ELETTRICI

I materiali isolanti solidi presentano un'elevata resistenza elettrica e questo ne scaturisce che le scariche parziali sono quasi sempre causate da difetti presenti nel dielettrico. Questi difetti consistono nella totalità dei casi di cavità riempite a causa di processi di diffusione pertanto una minore resistenza elettrica può essere dovuta ad una cavità piena d'aria le cui sollecitazioni aumentano al variare della distribuzione di campo elettrico.

Le Scariche Parziali possono avvenire per una moltitudine di cause negli isolanti come per esempio la presenza di difetti, bordi appuntiti, quindi monitorare le scariche non è un compito facile appunto per le differenti cause che possono scaturirne e per la presenza possibile di rumori e interferenze elettromagnetiche.

1.2.1 SCARICHE PARZIALI NEGLI ISOLANTI SOLIDI:

Le Scariche Parziali che possono avvenire negli isolanti solidi si suddividono in:

- 1)SCARICHE INTERNE
- 2)SCARICHE SUPERFICIALI

1)SCARICHE INTERNE:

Le scariche Parziali Interne sono causate maggiormente dalla presenza di difetti come cavità di gas riempite o bolle.

Durante una scarica in una cavità si verificano cambiamenti di campo che sono associati a trasferimenti di cariche tra la cavità stessa e l'elettrodo esterno.

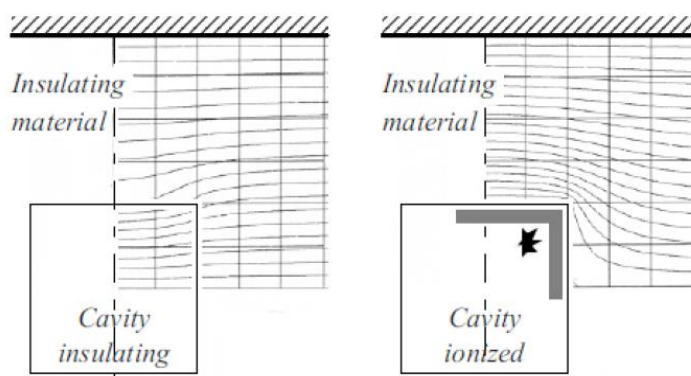


Figura 1.7: Scarica in una cavità interna all'isolante⁷

Nei dielettrici solidi le occlusioni presentano una costante dielettrica inferiore a quella del dielettrico principale mentre il campo elettrico è superiore a quello del dielettrico circostante quindi ne consegue che se il campo circostante presenta una quantità di valore modesta la scarica può rimanere limitata nella regione occupata dall'occlusione⁸.

⁷ Fonte: Andreas Küchler: "High Voltage Engineering, Fundamentals-Technology-Applications", Springer.

⁸ Fonte: G. Baldo, G. Pesavento, "Tecnica delle Alte Tensioni", Cleup 2004

Quando nella cavità avviene un'escursione di tensione corrispondente alla tensione di innesco si verifica la scarica successiva.

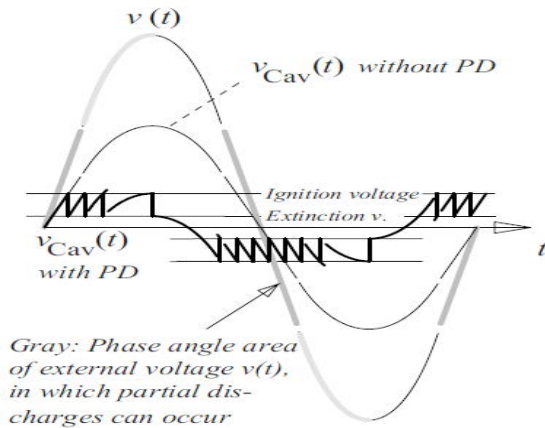


Figura 1.8: Scarica Parziale in AC [Fonte8]

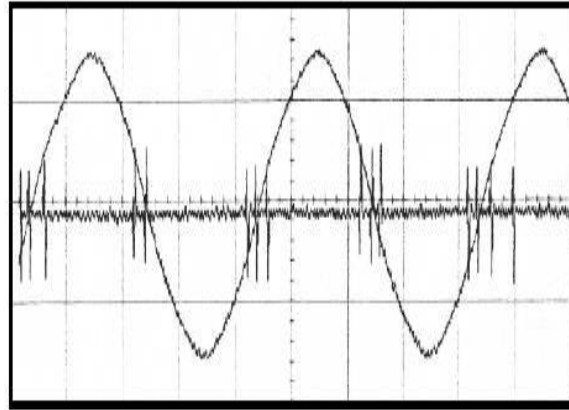


Figura 1.9: Misura sulle scariche parziali [Fonte8]

Come si osserva dalla figura 1.8 le scariche interne si verificano nell'area di maggior gradiente di tensione-tempo a intervalli regolari con escursioni di uguale tensione poiché la ricarica del difetto avviene principalmente in maniera capacitiva.

Una scarica interna in un materiale isolante può essere rappresentata dal seguente circuito capacitivo:

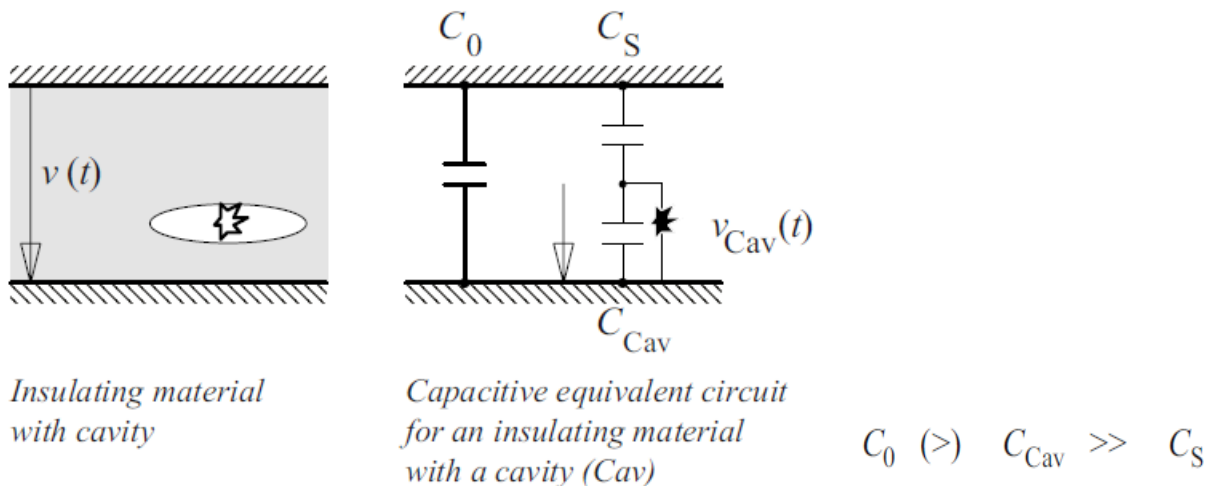


Figura 1.10: Circuito equivalente di una scarica interna [Fonte8]

Un' impulso di scarica parziale può essere rappresentata dalla sua capacità C_{Cav} [Fonte7].

Durante l'applicazione di una tensione alternata AC la ricarica viene effettuata per mezzo di una corrente di spostamento capacitiva che attraversa la capacità parziale C_S .

C_0 corrisponde alla capacità totale dell'isolante e si ha che $C_0 \gg C_S$. Oltretutto si presume che $C_{Cav} \gg C_S$ e che $C_0 \gg C_{cav}$ e quindi si può assumere che:

$$C_0 (>) C_{Cav} \gg C_S \quad (1.5)$$

In assenza di scariche parziali l'andamento della tensione della cavità $V_{Cav}(t)$ segue quello della tensione esterna $V(t)$ secondo il rapporto del divisore capacitivo di C_S e C_{Cav} come è raffigurato nella figura 1.8.

Se la tensione della cavità supera la tensione di innesco V_{bd} del gas gap e se l'elettrone iniziale è disponibile la tensione nella cavità si porta fino al valore della tensione di estinzione V_{ex} .

La capacità della cavità viene ricaricata capacitivamente per mezzo di C_S con velocità invariata della crescita di tensione.

L'evento singolo della scarica parziale avviene attraverso uno spostamento di tensione pari alla differenza di tensione $\Delta V = V_{bd} - V_{ex}$.

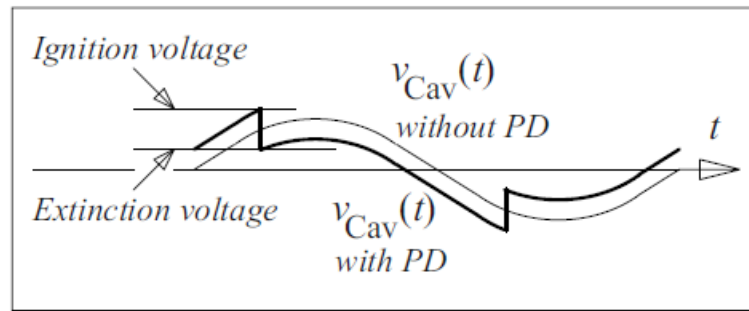


Figura 1.11: Andamento Tensione della cavità [Fonte8]

A seconda dell'ampiezza della tensione nella cavità si possono verificare scariche parziali multiple alla massima tensione ovvero alla tensione di innesco e possono avvenire interruzioni di tensione spostando la tensione di una quantità pari a ΔV . Nel mezzo ciclo successivo lo spostamento ripetuto della tensione nella cavità porta ad un raggiungimento precoce della tensione di innesco anche prima del passaggio per lo zero della tensione esterna $V(t)$.

La relazione di fase delle scariche parziali con la tensione $V(t)$ è rappresentata dall'ombreggiatura grigia e l'area di scarica inizia prima del passaggio per lo zero e si estende lunga la curva di tensione salendo verso il massimo.

Quando la tensione AC viene incrementata la prima scarica potrebbe avvenire con un angolo di fase in prossimità del massimo della tensione ma poiché la tensione V_{bd} è raggiunta proprio in corrispondenza del massimo gli scarichi successivi e nei successivi semicicli avvengono già durante l'aumento della tensione $V(t)$ prima che venga raggiunto il massimo negativo o positivo a causa dello spostamento della curva di tensione.

Quando la tensione AC viene abbassata le scariche parziali possono comunque ad esistere anche quando il valore di picco della tensione della cavità non raggiunge più il valore della tensione di innesco [Fonte8].

2)SCARICHE SUPERFICIALI:

Le scariche sulla superficie in un isolante solido o liquido sono dovute alla presenza di un elevata componente tangenziale di campo elettrico lungo un'interfaccia diagonale tra un liquido o solido ed il mezzo gassoso.

Le scariche superficiali si possono presentare in 3 diversi tipi di configurazioni:

- i) Campo elettrico perpendicolare verso una superficie, in questo caso la scarica avviene in direzione perpendicolare alla superficie. Questa non è effettivamente una scarica superficiale.
- ii) Per un campo elettrico parallelo alla superficie, si considera teoricamente che il campo elettrico non è influenzato dalla superficie. In questo caso lo sviluppo della scarica avviene nella stessa direzione di campo e quindi parallela alla superficie.
- iii) Sistemi di isolamento interfacciati con dielettrici solidi o liquidi sollecitati tangenzialmente. La bassa resistenza delle superfici tangenziali limita la tensione di tenuta a valori molto bassi e la resistenza del dielettrico sarebbe sfruttata solo parzialmente.

Tipici esempi di tali interfacce nella pratica sono passanti, isolatori e la terminazione dei cavi.

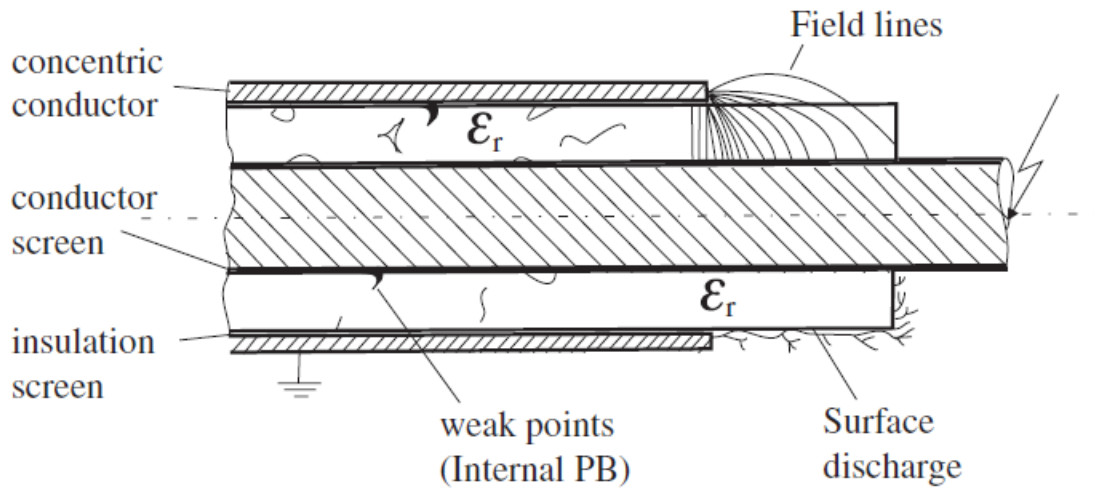


Figura 1.12: Conduttore concentrico soggetto a scarica superficiale [Fonte7].

Come mostra la figura 1.12 quando un cavo coassiale viene bruscamente interrotto l'intensità di campo sul punto di terminazione diventa estremamente elevata. Avviene un incremento della componente tangenziale del campo elettrico nel mezzo gassoso il quale viene stressato con un'elevata intensità di campo.

Una volta instaurata la scarica la variazione di distribuzione del campo elettrico porta all'estensione della scarica in zone diverse da quella iniziale portando così al deterioramento del dielettrico e quindi alla scarica completa.

La distorsione di campo inoltre può avvenire anche per la presenza di contaminazioni superficiali, bagnatura o inquinamento degli strati superficiali.

Per cercare di controllare l'andamento di campo elettrico lungo la superficie del materiale isolante esso viene rivestito di uno strato semiconduttivo in grado appunto di guidare il campo elettrico sfruttando la legge di Rifrazione del Campo elettrico che stabilisce un rapporto tra gli angoli di Campo tra i due dielettrici con le relative costanti dielettriche.

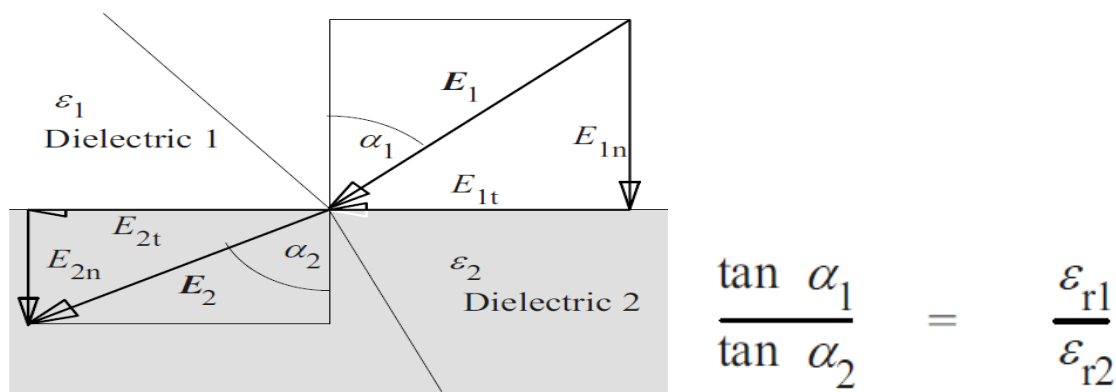


Figura 1.13: Rifrazione del Campo Elettrico [Fonte7]

In questo modo agendo sulle costanti dielettriche si è in grado appunto di controllare la direzione di campo.

Dal punto di vista della loro fase di accensione si è osservato che le tali scariche mostrano spesso incrementi di intensità dal passaggio per lo zero fino al picco.

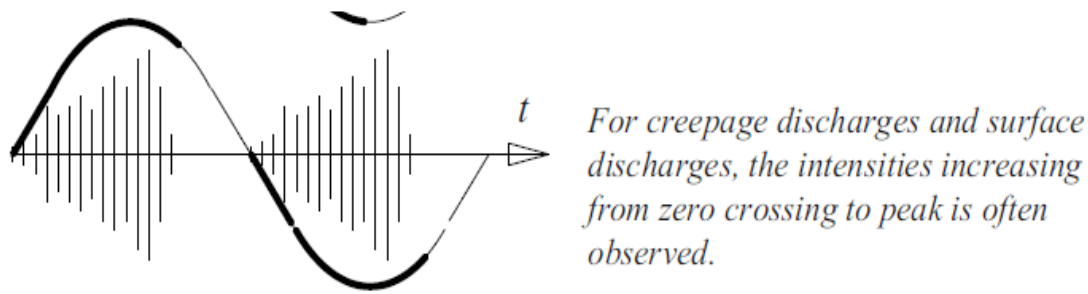


Figura 1.14: Andamento di una scarica superficiale [Fonte7]

Le possibili sorgenti di Scariche Parziali negli Isolanti Solidi possono essere riassunte dalla seguente figura:

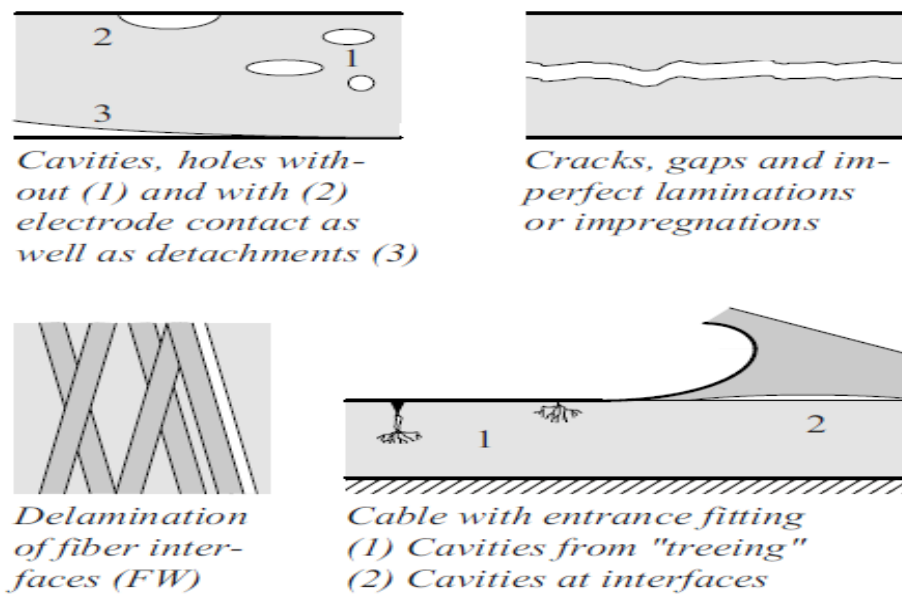
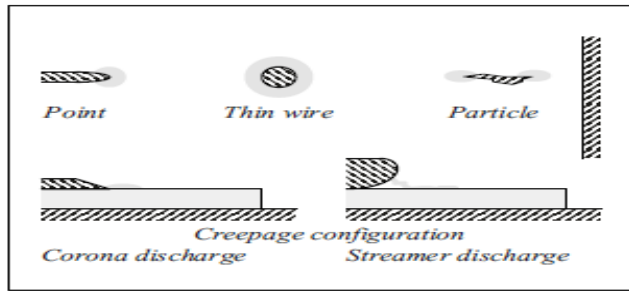


Figura 1.15: Sorgenti di Scariche Parziali negli isolanti Solidi [Fonte7]

1.2.2 SCARICHE PARZIALI NEGLI ISOLANTI IN GAS:

Per bassi valori di intensità di campo i gas dielettrici, rispetto ad altri materiali isolanti, presentano basse perdite, bassa conducibilità e una permittività relativa quasi indipendente dalla frequenza $\epsilon_r \approx 1$.

Per quanto riguarda invece le scariche che possono avvenire negli isolanti in gas, fonti tipiche di scariche sono le **Scariche Corona** che sono causate dalla presenza di bordi arrotondati, conduttori con piccoli diametri e particelle conduttive come rappresentate in figura:



Nella pratica, difetti superficiali, graffi, rugosità, e depositi di sporcizia negli elettrodi portano a scariche parziali.

Le **Scariche Superficiali** sono uno dei problemi tutt'ora affrontati dall'Ingegneria dell'alta tensione che colpiscono gli isolanti in Gas.

Figura 1.16: Scariche negli isolanti in Gas [Fonte7]

Da quanto detto quindi le scariche che colpiscono gli Isolanti in Gas si suddividono in:

- i) Scariche Corona
- ii) Scariche Superficiali

i) SCARICHE CORONA:

Le scariche per effetto Corona si verificano in condizioni di campo fortemente non uniforme di una disposizione di elettrodi in un isolante in gas quando la tensione di innesco viene superata all'aumentare della tensione. In AC tali scariche si verificano in un'area di massima tensione purchè la tensione superi la tensione di inizio corona.

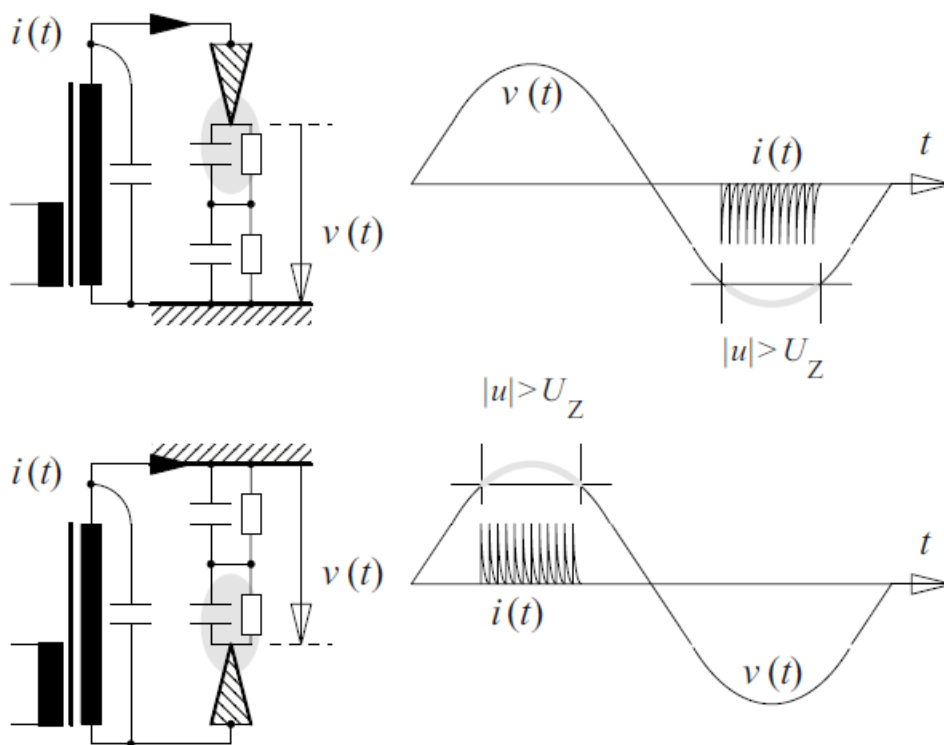


Figura 1.17: Scarica Corona in un isolante in gas con configurazione punto-piano [Fonte7]

Le scariche con polarità negativa avvengono quando la scarica parte dall'elettrodo e giunge al potenziale di terra.

Quando invece la scarica parte dal potenziale di terra e giunge all'elettrodo di parla di scarica con polarità positiva.

Le scariche sono una sequenza di impulsi di corrente e compaiono come impulsi di corrente $i(t)$ nel circuito elettrico esterno chiuso in modo capacitivo.

Dopo un impulso, le cariche spaziali accumulate durante la scarica si ricombinano o allontanano prima che un'altra scarica possa verificarsi in modo che si verifichi una sequenza regolare di impulsi (Impulsi Trichel) [Fonte7].

ii) SCARICHE SUPERFICIALI:

Le scariche superficiali si sviluppano spesso ai bordi degli elettrodi in maniera simile alle scariche Corona. La fase di accensione dipende dall'entità della tensione AC applicata $v(t)$. Se la tensione viene aumentata durante il mezzo ciclo aumenta l'intensità della scarica e la lunghezza dello streamer (scarica filamentare). Frequentemente tali scariche presentano intensità che aumentano dall'incrocio dello zero al picco e viene prodotto un effetto di polarità con il coinvolgimento dell'elettrodo.

Gli impulsi irregolari possono verificarsi con un grande trasferimento di carica e larghezze a metà valore di diversi 10s o ns.

1.2.3 SCARICHE PARZIALI NEGLI ISOLANTI LIQUIDI:

La presenza di piccoli raggi di curvatura nei conduttori, punti e particelle conduttive sono meno critici rispetto ai gas perché i liquidi presentano un'elevata rigidità.

Nei liquidi il rilascio di gas sotto forma di bolle ha un effetto grave, a causa dello spostamento del campo le bolle di gas già elettricamente deboli sono ancora più fortemente sollecitate e le scariche parziali avvengono con un'intensità di campo più debole.

La presenza di acqua comporta una riduzione significativa della rigidità elettrica, specialmente quando viene rilasciata acqua sotto forma di goccia, pertanto, i dispositivi oleodinamici devono essere ben asciugati e riempiti con olio degassato ed essiccato sottovuoto.

Le componenti tangenziali di campo elettrico che possono essere presenti sulle superfici di materiale isolante, come ad esempio i bordi di lamina metallica nei dielettrici del condensatore e nei sistemi di barriera del pannello dei trasformatori, possono causare scariche superficiali.

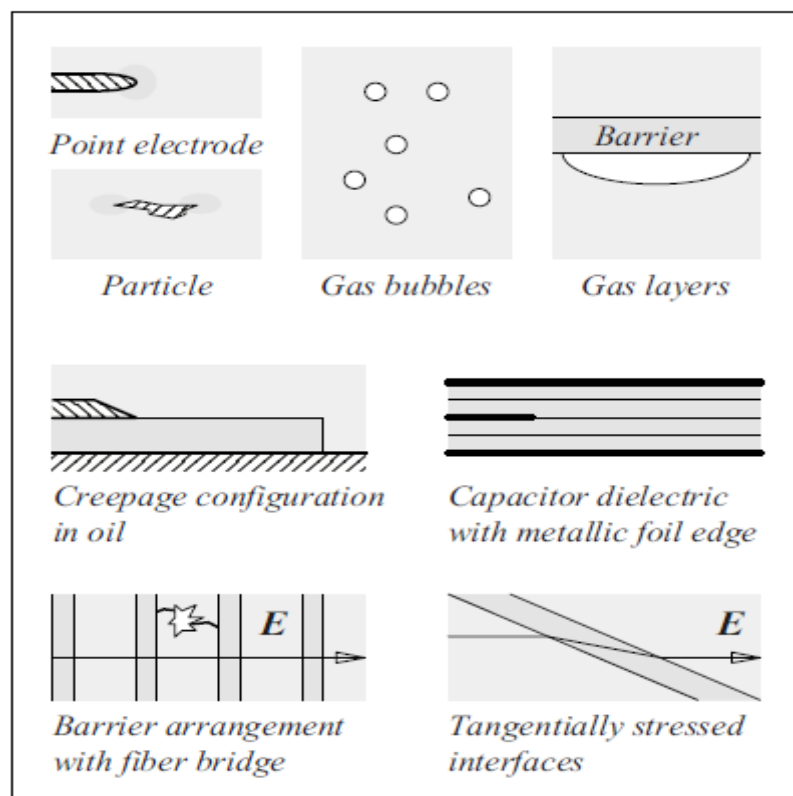


Figura 1.18: Sorgenti di Scariche Parziali negli isolanti liquidi [Fonte

2 CAPITOLO 2: MISURE E MONITORAGGIO DELLE P.D

2.1 MISURE SU SCARICHE PARZIALI:

Quando si parla di misure su Scariche Parziali si deve tenere conto non solo della capacità di catturare l'evento in sé, ossia la scarica, ma anche della capacità del sistema di misurazione stesso di fornire e acquisire i dati utili ad ottenere i risultati di misurazione.

La crescita della tecnologia informatica, dei personal computer e dei dispositivi microelettronici ha avuto un impatto importante sulla possibilità di poter misurare i fenomeni di scarica.

I fenomeni di scarica parziale sono caratterizzati dall'avere ordini di ampiezza che vanno dai pC a qualche centinaia di pC comparabili con le interferenze elettromagnetiche provenienti da dispositivi elettrici piazzati vicini al sistema di misurazione, onde radio e interferenze originate da linee aeree.

Il rischio che si può avere è quello che una scarica possa essere mascherata o addirittura possa essere considerata un'interferenza elettromagnetica da un sistema di rilevamento.

A scapito di ciò quindi il sistema di misurazione dovrà essere dotato anche di un sistema tale da ridurre l'effetto delle interferenze elettromagnetiche.

Le misure di scariche parziali vengono principalmente eseguite sui seguenti sistemi elettrici:

- Trasformatori
- Macchine rotanti
- Cavi

Detto ciò quello su cui vorrei più soffermarmi su questo paragrafo sono le quantità ovvero le grandezze di cui si deve tenere conto in una misura di scarica parziale.

2.1.1 GRANDEZZE MISURISTICHE DELLE SCARICHE PARZIALI:

1. CARICA APPARENTE:

La Carica Apparente costituisce la grandezza caratterizzante una Scarica Parziale e la sua definizione secondo la norma IEC 60270 è:

Quella carica che, se iniettata in un tempo molto breve tra i terminali dell'oggetto di prova in un circuito di prova specificato, darebbe la stessa lettura sullo strumento di misura della corrente di Scarica Parziale stessa. La carica apparente viene solitamente espressa in piccoCoulomb(pC).

Da questo Standard si può notare che la carica apparente non è uguale alla quantità di carica localmente coinvolta nel sito di scarica, il quale non può essere misurato direttamente.

2. TENSIONE DI INNESCO E DI ESTINZIONE:

La tensione di innesco V_i e la tensione di estinzione V_e sono tenute conto nei componenti o dispositivi per le Alte Tensioni che non hanno superato il test di tipo o di sviluppo o addirittura il test di garanzia della qualità dopo la produzione.

Le Scariche Parziali sono spesso riconosciute da una chiara isteresi e una tensione di estinzione inferiore alla tensione di innesco come mostrata dalla seguente figura:

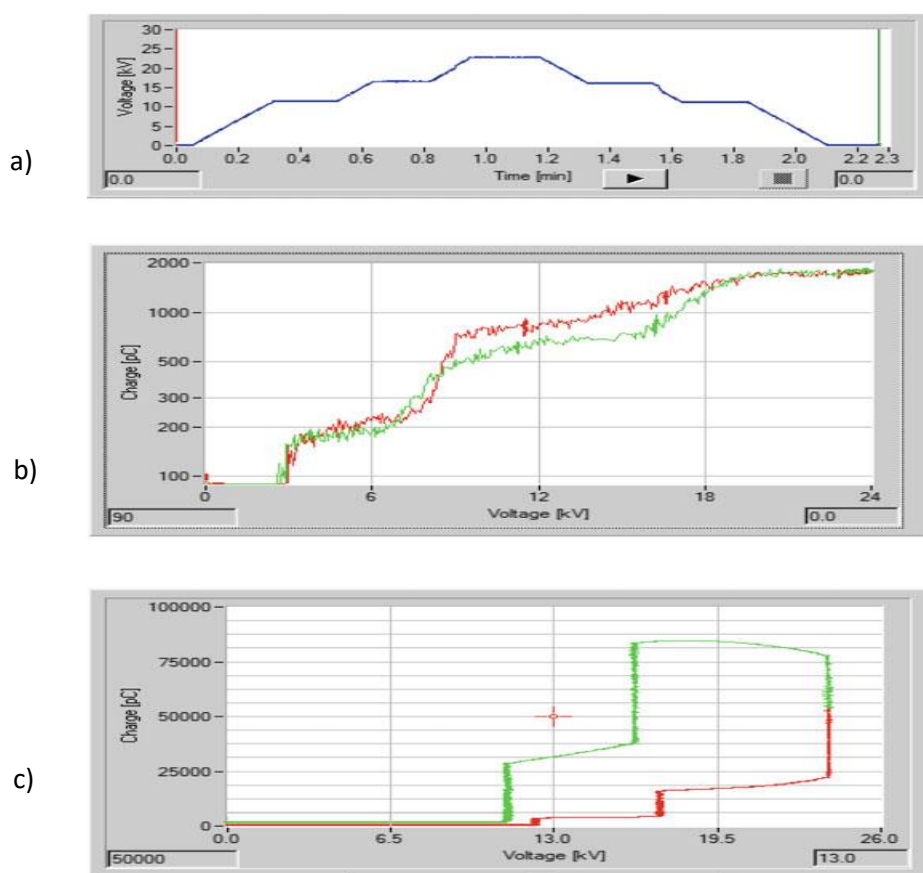


Figura 2.1: a) Profilo di test tensione AC a 50 Hz, b) livello delle PD di una barra di statore sotto tensione di prova in aumento (traccia rossa) e diminuzione (traccia verde), c) livello PD di una barra di statore 'difettosa'⁹

Per una migliore interpretazione dei risultati sulla misura la Carica Apparente deve superare il livello di rumore di fondo, che dovrebbe quindi essere mantenuto il più basso possibile per evitare risultati errati nei test.

Prendiamo in considerazione la seguente figura dove si tiene conto di un test eseguito sulla terminazione del cavo XLPE difettoso a tensione nominale di 36 kV:

⁹ Fonte: Wolfgang Hauschild · Eberhard Lemke: "High-Voltage Test and Measuring Techniques", Second Edition

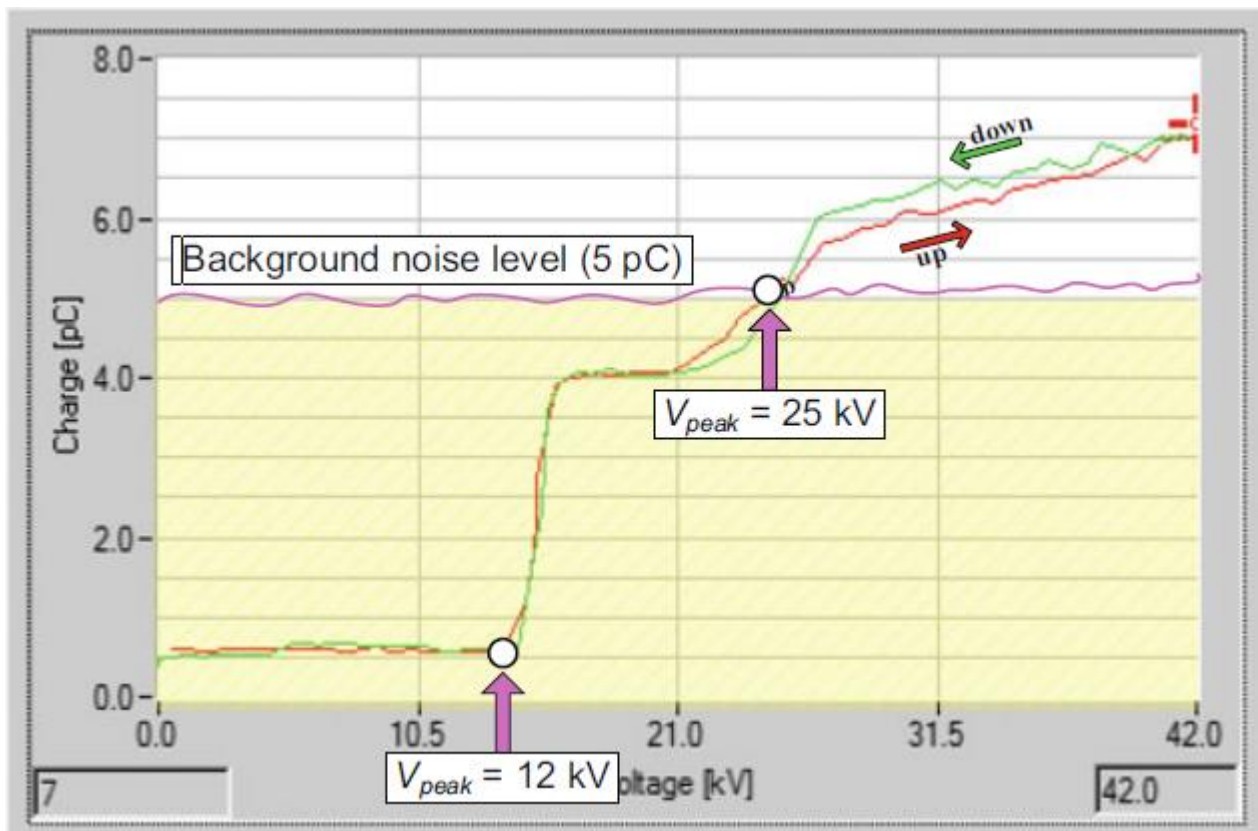


Figura 2.2: Impatto del livello di rumore di fondo sulla determinazione della Vi e Ve [Fonte9]

In laboratorio si assume una condizione di rumore $<0,5$ pC ed è stata misurata una Vi pari a 12 kV di picco. Supponendo invece un livello di rumore di fondo di 5 pC la tensione di innesco aumenterebbe fino a 25 kV come mostra la figura 2.2.

3. ANGOLO DI FASE:

L'angolo di fase viene definito secondo la IEC 60270:2000 nel seguente modo:

$$\phi_i = \frac{\Delta t_i}{T_c} * 360 \quad (2.1)$$

Dove risulta:

- Δt_i : intervallo di tempo che intercorre tra l'attraversamento negativo-positivo della tensione di prova AC applicata e quell'istante in cui l'impulso PD avviene.
- T_c : durata di ciclo della tensione di prova AC applicata.

Nei test pratici l'angolo di fase effettivo su ogni singolo impulso di scarica è di solito di minor interesse mentre la distribuzione dei treni di impulsi PD correlata all'angolo di fase della tensione di prova AC applicata è utile per identificare possibili sorgenti di PD.

Un esempio pratico di tali test viene considerato nella seguente figura:

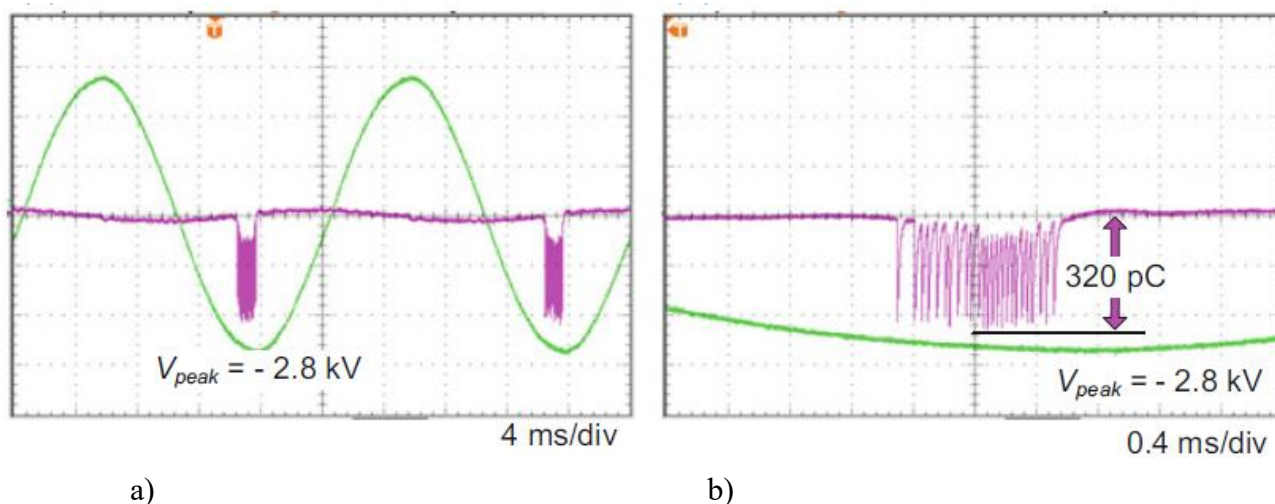


Figura 2.3: Impulsi di carica apparente (tracce rosa) di scariche di Trichel che avvengono in configurazione di gap ago-ago di 3,5 mm sotto tensione di test AC (traccia verde) visualizzato da una base temporale di 4 ms/div, a) e 0,4 ms/div, b)

Come si può vedere gli impulsi di Trichel sono distribuiti casualmente attorno alla regione di picco negativa della tensione di prova AC applicata con un angolo intorno ai 270° .

Un'altro esempio considera la presenza di scariche superficiali e scariche interne rappresentate da un oscilloscopio.

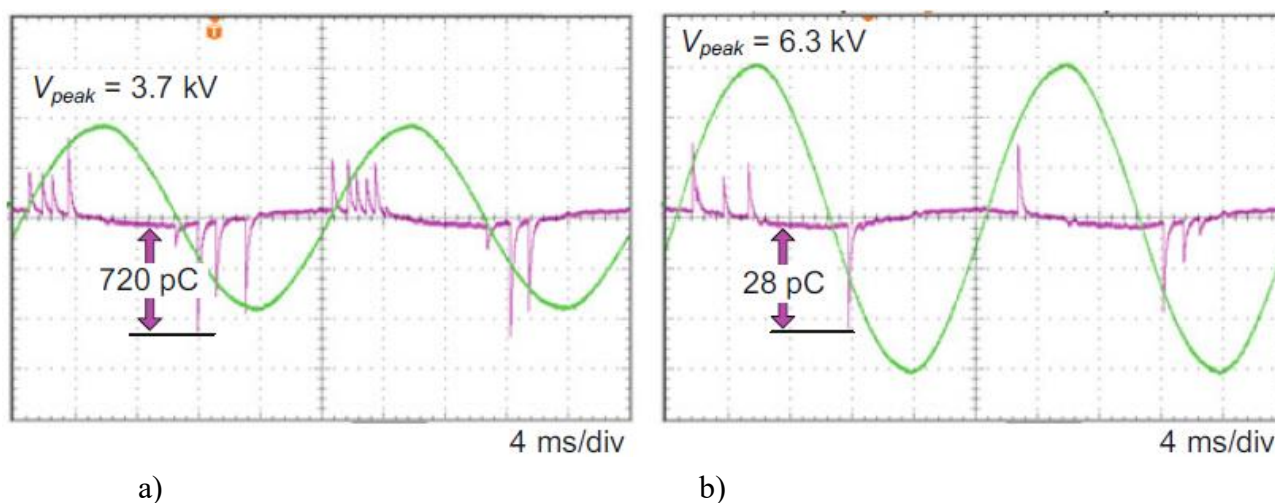


Figura 2.4: Tracce osciloscopiche di impulsi di corrente (tracce rosa) acquisite per scariche superficiali a) e scariche di cavità b) sotto tensione (tracce verdi) [Fonte9].

Da come si vede gli impulsi sono distribuiti attorno all'attraversamento nello zero della tensione di prova AC, vale a dire le scariche superficiali presentano angoli di fase compresi tra 0° e 180° .

Le scariche interne sono qualitativamente comparabili con le scariche superficiali, tuttavia l'ampiezza degli impulsi delle scariche superficiali è maggiore di quelle delle scariche interne permettendo così di discriminare i due tipi di scarica [Fonte9].

4. FREQUENZA DI RIPETIZIONE DELL'IMPULSO:

La ripetizione dell'impulso n delle scariche parziali viene definita in accordo con la IEC 60270:2000 nel seguente modo:

$$n = \frac{Np}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Dove Np è il numero totale di impulsi di PD e Δt l'intervallo del tempo di registrazione.

Nella pratica si tiene conto degli impulsi di scariche parziali che superano un'ampiezza specificata o si verificano entro un'intervallo di ampiezza definito.

Come esempio di applicazione consideriamo le misure fatte con oscilloscopio di un Trasformatore di potenza 110 kV:

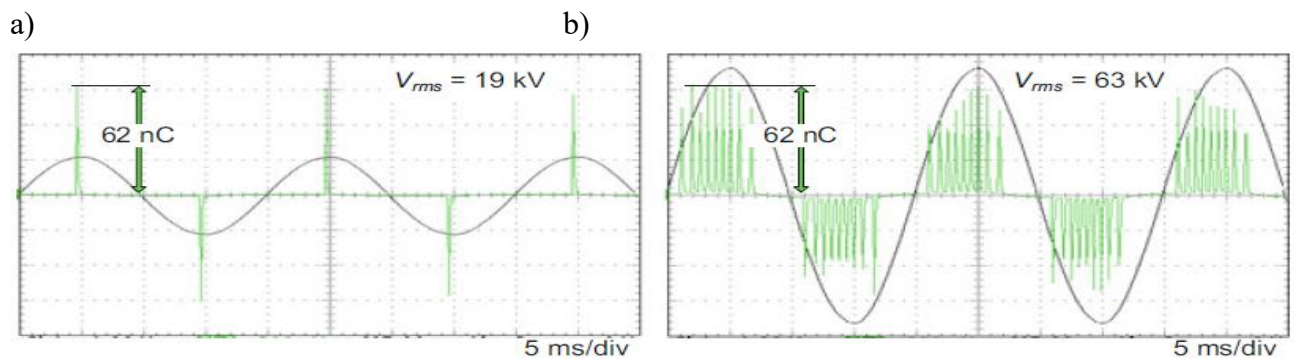


Figura 2.5: Rappresentazione oscilloscopica delle scariche su un passante di un trasformatore a 110 kV. a) $V_{rms}=19$ kV, b) $V_{rms}=71$ kV [Fonte9].

Incrementando la tensione di prova fino al valore di $V_{rms}=19$ kV un singolo impulso appariva in ogni semiciclo dove la carica apparente superava i 60 nC di ampiezza (figura 2.4a).

E' stato scelto un tempo di registrazione di $\Delta t=50$ ms ottenendo una ripetizione di impulso pari a $n=100$ s^{-1} .

Aumentando ulteriormente la tensione fino al valore di $V_{rms}=71$ kV, l'entità degli impulsi di carica apparente è costante mentre il numero di impulsi ha raggiunto il valore di $n=700$ s^{-1} [Fonte9].

5. CARICA APPARENTE ACCUMULATA

La carica apparente accumulata q_n viene definita dalla IEC 60270:2000 nel seguente modo:

$$q_n = |q_1| + |q_2| + |q_3| + \dots + |q_i| \quad (2.3)$$

con $|q_1|$, $|q_2|$, $|q_3|$, ... i valori assoluti delle cariche apparenti ed i il numero di impulsi PD catturati all'interno dell'intervallo Δt_r .

In determinate condizioni pratiche vengono tenuti conto solo gli impulsi di PD che superano un determinato livello di soglia o si verificano entro limiti di carica apparente specificati.

Come esempio consideriamo la terminazione di un Cavo in XLPE con una tensione di 24 kV rappresentato dalla seguente figura:

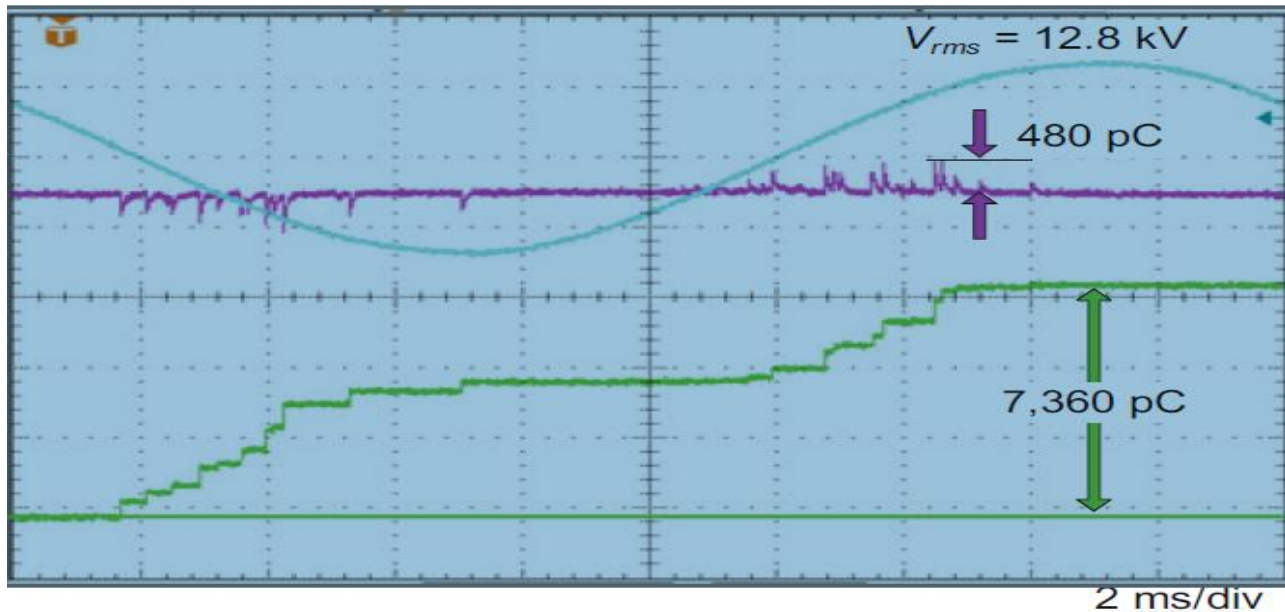


Figura 2.6: Rappresentazione oscilloscopica degli impulsi di scarica della terminazione di un cavo XLPE. Impulsi di carica apparente (traccia rosa), carica apparente accumulata (traccia verde) [Fonte9].

Incrementando la tensione AC fino al valore di prova $V_{rms}=12,8 \text{ kV}$, il valore registrato di massima carica apparente dei treni di impulsi PD è stata quasi di 500 pC(traccia rosa), mentre la carica apparente accumulata ha superato 7000 pC per ciclo [Fonte9].

6. CORRENTE DI SCARICA MEDIA:

La corrente di scarica media I_n definita dalla IEC 60270:2000 è espressa dalla seguente formula:

$$I_n = \frac{1}{T_{ref}} * [/q_1/+ /q_2/+ /q_3/+ \cdots /q_i \ /] = \frac{qn}{T_{ref}} \quad (2.4)$$

Dove T_{ref} è la scelta dell'intervallo di tempo di riferimento ed i il numero di impulsi di PD catturati. Come esempio numerico consideriamo la figura 2.5 della pagina precedente. Inserendo una carica accumulata pari a 7360 pC dall'equazione 2.3 si ottiene [Fonte9]:

$$I_n = \frac{7360}{20ms} \approx 0,37\mu A$$

7. POTENZA DI SCARICA:

La determinazione della potenza di scarica in accordo con la IEC 60270:2000 si basa sulla seguente espressione:

$$P_n = \frac{1}{T_{ref}} * \{ /q1 * v1 / + /q2 * v2 / + /q3 * v3 / + \dots /qi * vi / \}, \quad (2.5)$$

Con $v_1, v_2, v_3, \dots, v_i$ i valori delle tensioni di prova AC nell'istante in cui i valori degli impulsi q_1, q_2, q_3 vengono catturati.

Quello di cui si deve tenere conto è che l'angolo di fase della tensione di prova AC coincide con la tensione applicata ai terminali dell'oggetto di prova.

Per determinare la potenza di scarica P_n con precisione di misurazione in modalità di tempo reale è necessario l'utilizzo di sistemi di misurazione computerizzati [Fonte9].

8. TASSO QUADRATICO:

Il tasso quadratico definita dalla IEC 60270:2000 presenta la seguente espressione:

$$D_n = \frac{1}{T_{ref}} * \{ q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + \dots + q_i^2 \} \quad (2.5)$$

Per determinare tale parametro in tempo reale con estrema accuratezza si deve utilizzare necessariamente sistemi di misura computerizzati.

Questa quantità usata di rado è stata introdotta per tenere conto della gravità degli impulsi elevati delle scariche parziali [Fonte9].

2.2 MONITORAGGIO DELLE P.D

Come abbiamo detto precedentemente il monitoraggio è importante perché permette di conoscere istante per istante i valori che una determinata grandezza di analisi presenta.

Per quanto concerne al monitoraggio delle scariche parziali, il suo scopo è quello di permettere di rilevare la possibile presenza di scariche nel sistema di nostro interesse e quindi di poter tenere sotto controllo la qualità del sistema di isolamento.

Inoltre il sistema di monitoraggio deve essere capace di sopprimere le possibili interferenze elettromagnetiche presenti nel sistema quindi l'importanza della sua realizzazione incide sia sulla possibilità di rilevare i guasti ma anche di essere capace di non comportare possibili incomprensioni tra i vari dispositivi.

I dati pre-elaborati vengono inviati ad un computer principale che gli elabora ulteriormente e gli archivia in un database principale connesso al computer degli utilizzatori locali il quale può esaminarli ulteriormente.

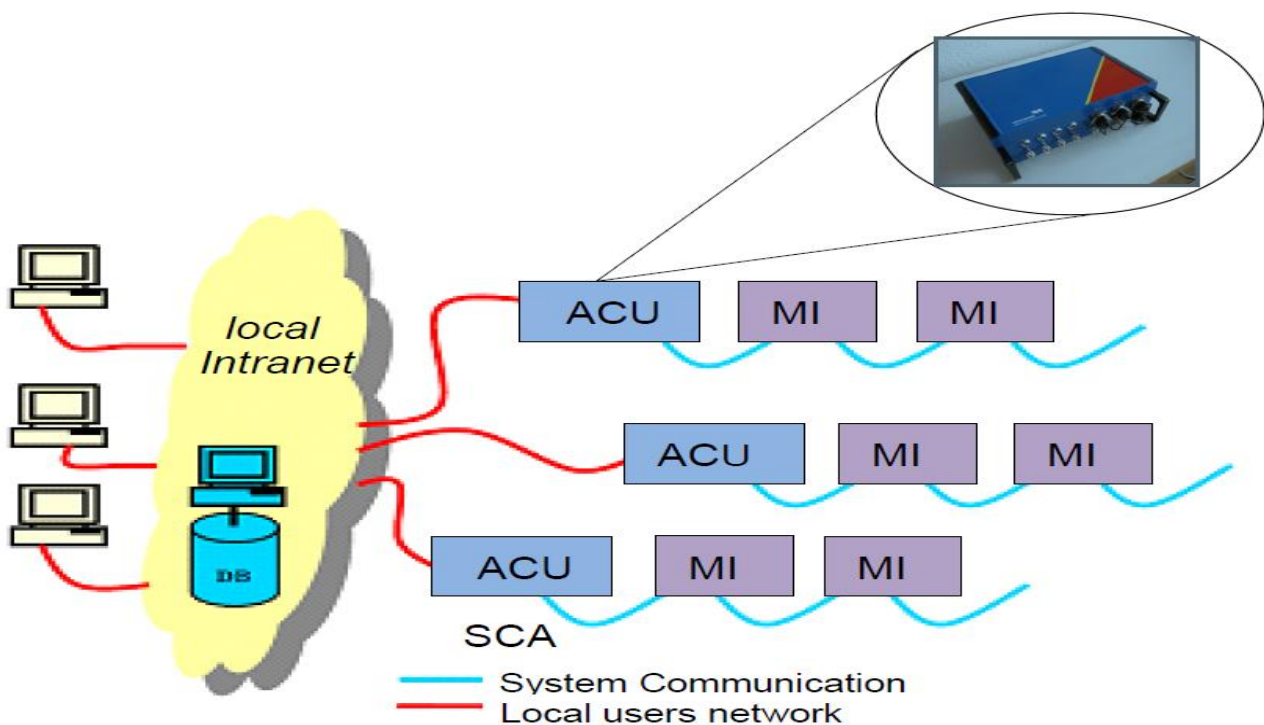
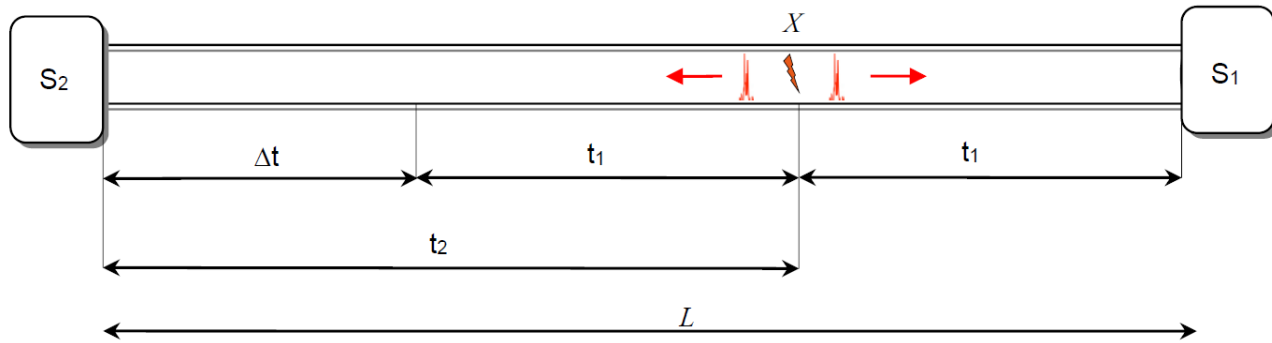


Figura 2.7: Struttura di un sistema di monitoraggio¹⁰

Il principio utilizzato, per individuare il punto dove avviene la scarica parziale, si basa sull'intervallo di tempo che ci impiega l'impulso a propagarsi lungo la linea.

21

Per cercare di capire tale principio consideriamo di avere due sensori S1 ed S2 alla fine del cavo di lunghezza L.



All'istante t_0 si assume che avviene una scarica in un generico punto X della linea.

L'impulso propagante lungo la linea raggiunge il sensore S_1 all'istante t_1 . Successivamente il sensore S_1 rileva l'impulso attraverso l'attivazione di un conteggio.

Dopo un tempo $t_2 \geq t_1$ l'impulso viene rilevato da S_2 il quale invia un segnale di stop al conteggio.

Quindi il tempo di conteggio risulta $\Delta t = t_2 - t_1$.

Essendo l'impulso propagante lungo la linea alla velocità v prossima alla velocità della luce, si è in grado di ottenere che:

$$t_2 = t_1 + \Delta t \text{ [ns]} \quad (2.6)$$

In questo modo si è in grado di determinare il punto X dove avviene la scarica nel seguente modo:

$$X = \frac{L - v\Delta t}{2} \quad (2.7)$$

La presenza di un segnale di attenuazione dovuto alla comparsa di discontinuità lungo la linea (giunti o scatole cross-bonding) comporta la necessità di installare i sensori in maniera distribuita lungo la linea e non solo nelle estremità del cavo.

Le scariche parziali hanno il difetto di poter comparire in differenti zone del sistema di trasmissione e in differenti modi quindi il sistema di monitoraggio deve essere capace, oltre a rilevare la presenza della scarica, anche capire da dove esso si è originato.

Le varie tipologie di scariche parziali che un sistema di monitoraggio deve prendere in considerazione sono:

-Scariche Parziali Interne:

Attraverso il monitoraggio eseguito per le scariche Parziali Interne si è osservato che si originano in corrispondenza della variazione massima della tensione fornita con un angolo di fase compreso tra 0° - 45° e tra 140° - 180° .

L'ampiezza dell'impulso inoltre varia dai pC ai 250 pC.

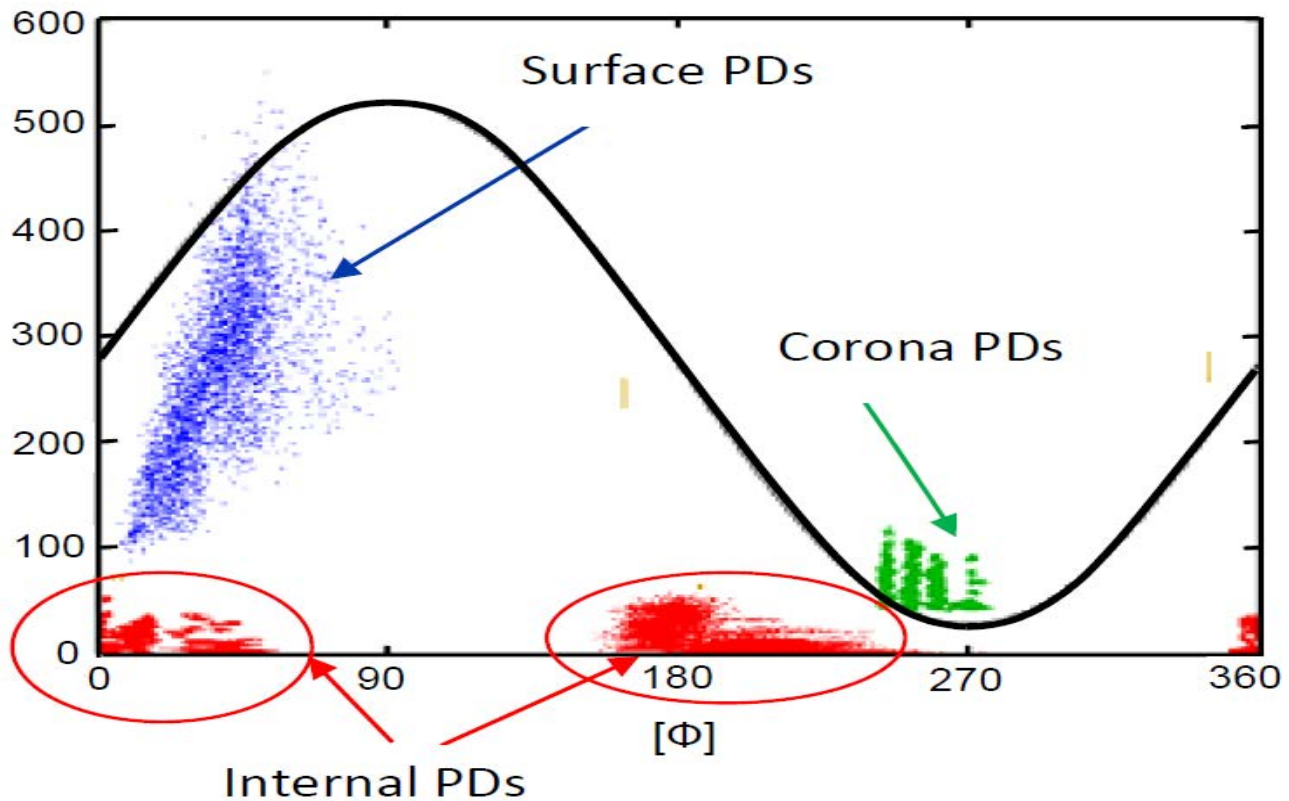


Figura 2.8: Fase di iniezione di una Internal Partial Discharge[Fonte10].

-Scariche Parziali Superficiali:

Le Scariche Parziali superficiali sono caratterizzate dall'aver l'inizio dell'impulso dal passaggio per lo zero al valore massimo della tensione fornita e presentano un angolo tra $0^\circ - 90^\circ$ e $180^\circ - 270^\circ$. L'impulso presenta un'ampiezza tra 100 pC a valori superiori ai 500 pC.

-Scarica Corona:

Per quanto riguarda le scariche per effetto Corona esse sono originate in corrispondenza del minimo punto della variazione della tensione e comprendono angoli di fase tra $90^\circ - 270^\circ$ e ampiezze maggiori di 200 pC [Fonte10].

3 CAPITOLO 3: TECNOLOGIA STRUMENTALE:

3.1 METODI DI MISURAZIONE ELETTRICHE DELLE SCARICHE PARZIALI

La realizzazione di un sistema di misura deve tenere conto di vari aspetti, tra cui, la capacità degli strumenti di interagire a vicenda e delle interruzioni derivanti da possibili interferenze elettromagnetiche.

Il sistema inoltre deve comprendere:

- Sorgente di alimentazione di Tensione
- Dispositivi per la riduzione del rumore
- Impedenza di misura nella quale sono causati gli impulsi di scarica del campione di prova
- Accoppiamenti capacitivi il quale facilitano il passaggio di impulso della corrente ad elevata frequenza
- Amplificatori
- Rilevatori e unità di visualizzazione

Il sistema di misura viene a essere composto di molti strumenti collegati tra di loro che devono collaborare per rilevare il fenomeno della scarica.

Generalmente dal punto di vista circuitale un sistema di misurazione è rappresentato dal seguente circuito:

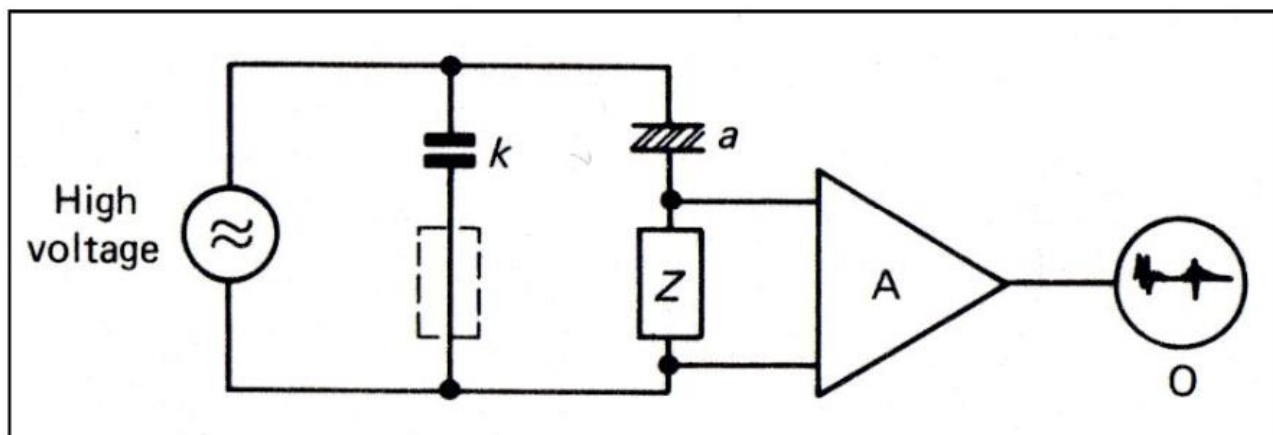


Figura3.1: Schema di misura diretta delle scariche parziali¹¹

Il sistema di misurazione è costituito da:

- Un alimentatore di tensione
- Un oggetto di prova di capacità a
- Un'impedenza Z soggetto agli impulsi di scarica
- Una capacità di accoppiamento k che permette il passaggio degli impulsi di corrente in alta frequenza
- Un amplificatore A
- Un'unità di osservazione O che comprende un sistema di visualizzazione oppure un campionatore di impulsi

¹¹ Fonte: Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment –F.H. Kreuger 1989

Per quanto riguarda invece i metodi di misurazione utilizzati per il rilevamento delle scariche parziali essi comprendono:

1)METODO DI RILEVAZIONE DIRETTA

2)METODO DI RILEVAZIONE BILANCIATA

1)METODO DI RILEVAZIONE DIRETTA:

Lo schema circuitale utilizzato per applicare il metodo della rilevazione diretta è il seguente:

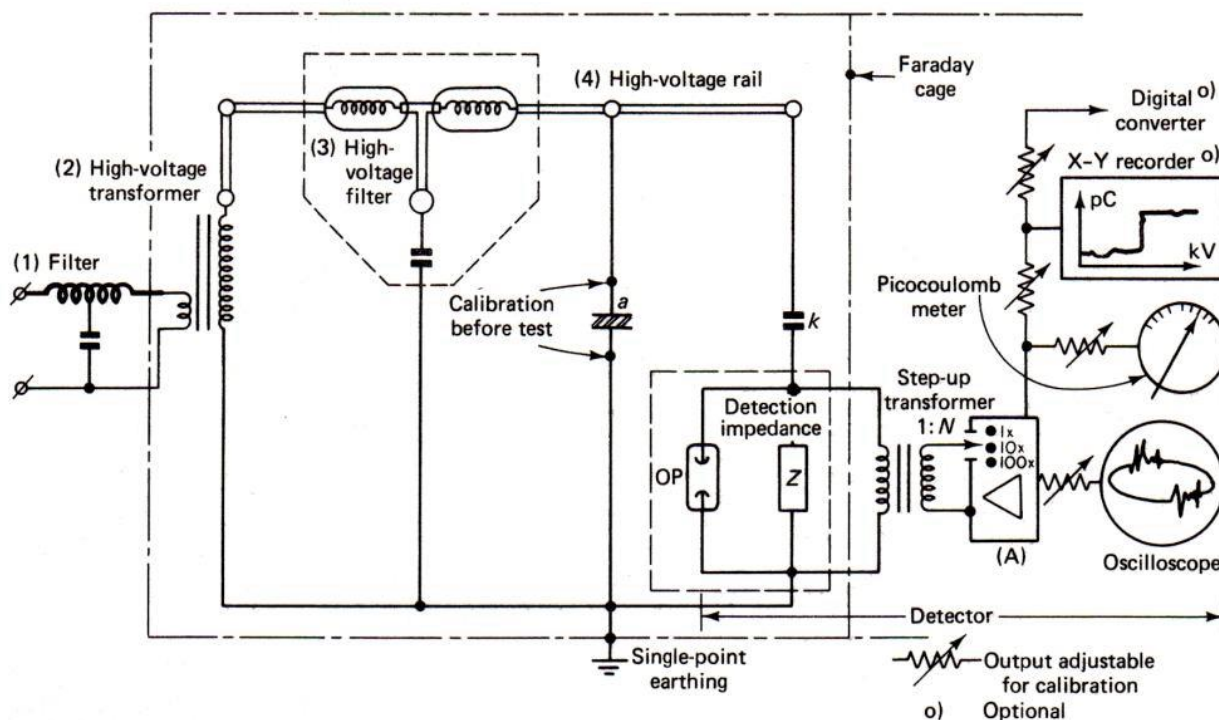


Figura3.2: Schema di misura del metodo di rilevazione diretta [Fonte11]

Caratteristiche circuitali:

- Filtro di alimentazione realizzato per sopprimere le interferenze provenienti dalla rete.
- Trasformatore di alta tensione, deve essere privo di scariche parziali.
- Filtro utilizzato per sopprimere le interferenze sia di rete che quelle derivanti da scariche provenienti dal trasformatore di alta tensione.
- Sbarra di interconnessione tra sorgente di alimentazione e oggetto in prova.
- Oggetto di prova (a) connesso di solito tra l'alta tensione e la terra.
- Capacità di accoppiamento k, deve essere priva di scariche parziali ed è di solito collegata all'impedenza di misura Z.
- Impedenza di misura Z connessa in parallelo ad uno scaricatore per prevenire possibili sovratensioni che possono nascere ai suoi capi. L'impedenza può essere di natura ohmica o un circuito risonante oppure un filtro passa-basso con una banda passante elevata. Può essere connessa in serie con la capacità di accoppiamento k oppure direttamente con il campione di prova (a).
- Trasformatore elevatore 1:N che separa il rumore del circuito da quello dell'amplificatore
- Amplificatore A avente una larghezza di banda molto più elevata di quella dell'impedenza di misura Z.
- Gli impulsi vengono visualizzati tramite un oscilloscopio nella modalità preferita mentre il valore più alto di picco della scarica parziale viene indicato da un voltmetro di cresta calibrato in picocoulomb.

- Il circuito di prova si trova all'interno di una gabbia di Faraday ed entrambi hanno lo stesso collettore di terra.

L'impedenza di misura Z come abbiamo detto può essere di tipo RC oppure risonante RLC:

- CIRCUITO RC:

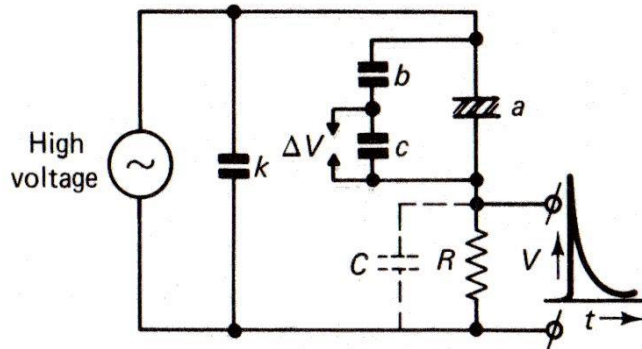


Figura 3.3: Circuito RC[Fonte11]

Nel caso di circuito RC l'impulso si calcola come:

$$V = \left[\frac{q}{a + C * \left(1 + \frac{a}{k}\right)} \right] * e^{-\left(\frac{t}{R * m}\right)} = \Delta V * e^{-\left(\frac{t}{R * m}\right)} \quad (3.1)$$

Mentre l'ampiezza della carica q è data da:

$$q = b * \Delta V \quad (3.2)$$

Dove a, C, k sono rappresentati nel circuito.

Mentre m è dato da:

$$m = \left(\frac{a * k}{a + k} \right) + C \quad (3.3)$$

- Mentre nel circuito RLC l'impulso è

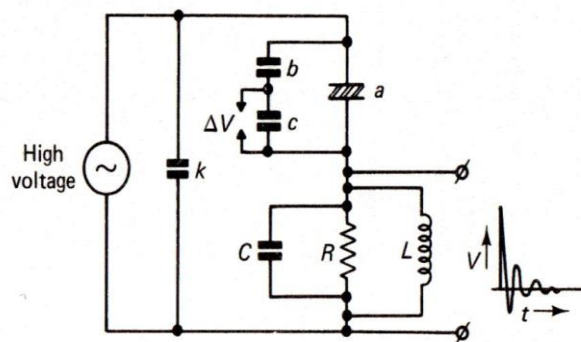


Figura 3.4: Circuito RLC[Fonte11]

$$V = \left[\frac{q}{a + C * (1 + \frac{a}{K})} \right] * e^{-\left(\frac{t}{2 * R * m}\right)} * \cos(\omega * t) \quad (3.4)$$

Dove:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L * m} - \frac{1}{4 * R^2 * m^2}} \quad (3.5)$$

Dalle formule ottenute si può osservare che:

- L'impulso è proporzionale alla carica q ed indipendente dalla resistenza R e segue una legge esponenziale con costante di tempo $R * m$
- Un valore piccolo della resistenza R permette di avere una costante di tempo piccola e quindi si può avere in uscita un impulso di breve durata permettendo di registrare più impulsi.
- Se $K \rightarrow 0$ allora $\Delta V \rightarrow 0$ quindi la capacità di accoppiamento è di fondamentale presenza
- L'ampiezza dell'impulso è inversamente proporzionale alla capacità dell'oggetto in prova

Quindi dalle formule considerate e dalle osservazioni fatte le caratteristiche relative al sistema di misurazione diretta sono che:

- La risposta alla scarica q è ottenuta tramite l'ampiezza e la forma degli impulsi dall'impedenza di rilevazione.
- La sensibilità è data da:

$$q_{sens} = 4 * 10^{-4} * \frac{\sqrt{1+n}}{\zeta} * \sqrt{a + (1+n) * C} \quad (3.6)$$

Dove ζ è la risposta dell'amplificatore ed a e C sono dati in picofarad.

- La risoluzione è determinata dall'oscilloscopio, dall'impedenza di accoppiamento e dall'amplificatore e rappresenta il numero di scariche parziali che possono essere risolte in un quadrante [Fonte11].

Per quanto riguarda la taratura del sistema esso viene realizzato con circuito di alimentazione aperto, si inietta, mediante un calibratore, un impulso di carica ai capi del provino e si esamina la risposta con un oscilloscopio.

Il circuito di calibrazione è il seguente:

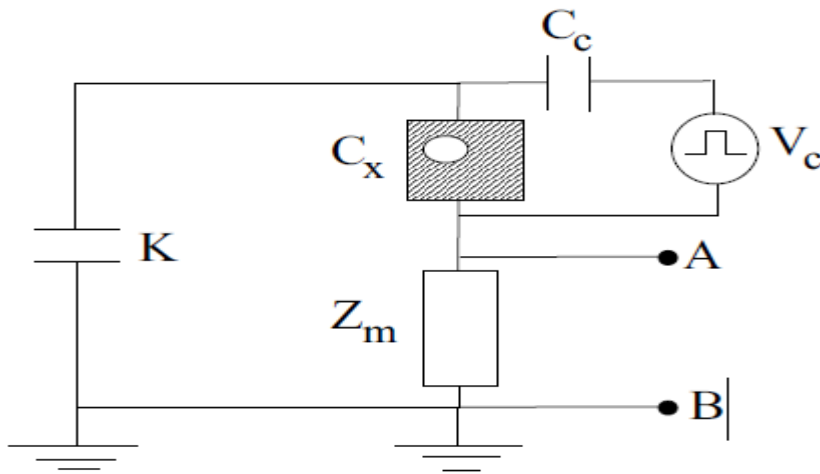


Figura 3.5: Circuito di calibrazione¹²

Il calibratore è composto essenzialmente da un generatore di tensione ad onda quadra collegato in serie ad una capacità C_c molto più piccola della C_x .

La carica Q_x iniettata nell'oggetto di prova si calcola come:

$$Q_x = V_c * \frac{C_c * C_x}{C_c + C_x + \left(\frac{K * C_m}{K + C_m} \right)} \quad (3.7)$$

Dove C_m è la capacità dell'impedenza Z_m .

Essendo che:

$$K \gg C_m$$

$$C_x \gg C_m$$

$$C_x \gg C_c$$

Si ottiene:

$$Q_x = V_c * C_c \quad (3.8)$$

In questo modo sull'oscilloscopio appare l'impulso di calibrazione che può essere opportunamente dimensionato per impostare la deflessione verticale desiderata (picoCoulomb/divisione).

Questa tipologia di misura viene normalmente utilizzata nelle prove di routine su prodotti industriali e lo svantaggio di questo metodo è che non si riesce a distinguere i segnali provenienti dall'oggetto in prova e quelli esterni. Se si vuole avere tale distinzione si usa il metodo con il ponte bilanciato [Fonte12].

2) METODO DI RILEVAZIONE BILANCIATO

Il circuito elettrico alla base del principio del metodo di rilevazione bilanciato è il seguente:

¹² Fonte: A.E.W Austen and S. Whitehead, "Discharges in Insulation under Alternating Current Stresses", Journal IEE, Vol.88, Part II, pp. 18-23, 1941

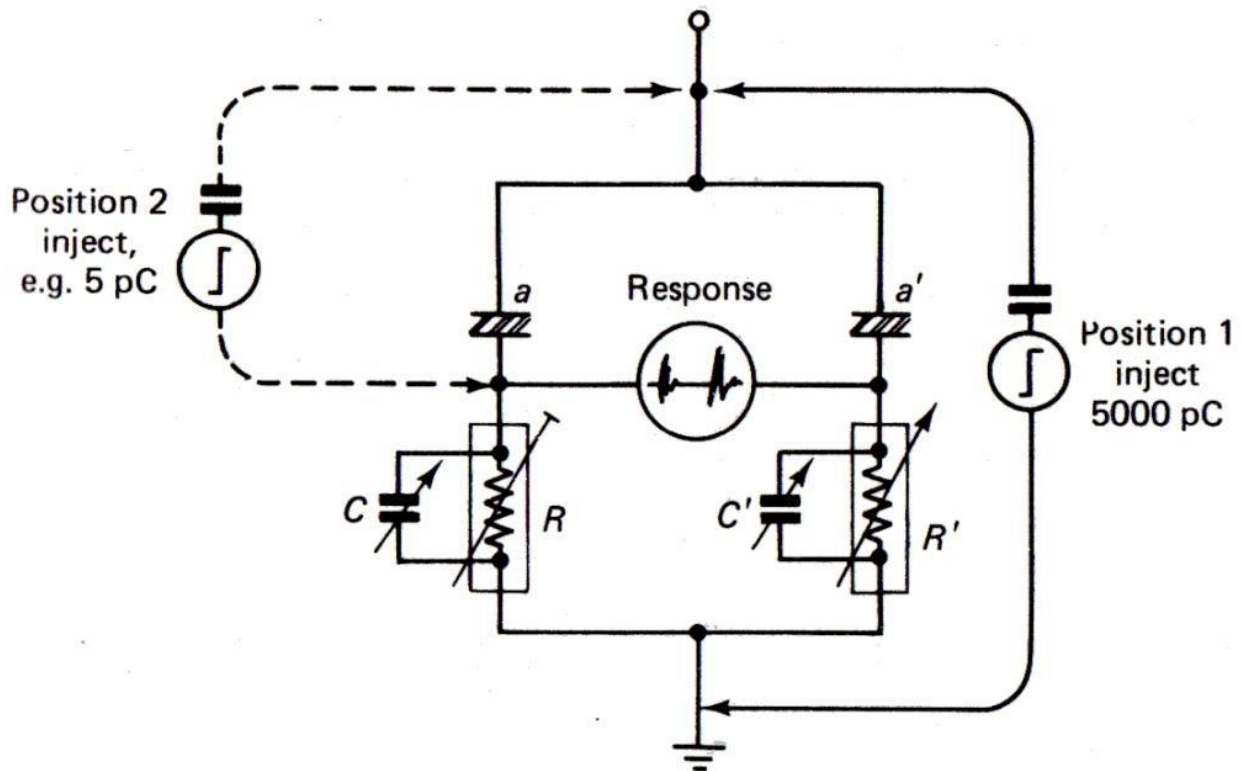


Figura 3.6: Circuito utilizzato per il metodo di rilevazione bilanciata [Fonte11].

La rilevazione delle scariche parziali avviene in maniera simile al metodo diretto soltanto che in questo caso vengono soppressi i rumori esterni ovvero le scariche parziali provenienti dalle capacità parziali o dal trasformatore sono ridotti.

Le impedenze nella figura 3.6 sono variabili per permettere di ottenere il bilanciamento, mentre le capacità a ed a' sono quasi identiche ma si ottengono buoni risultati anche con parametri diversi.

Il bilanciamento viene eseguito nel seguente modo:

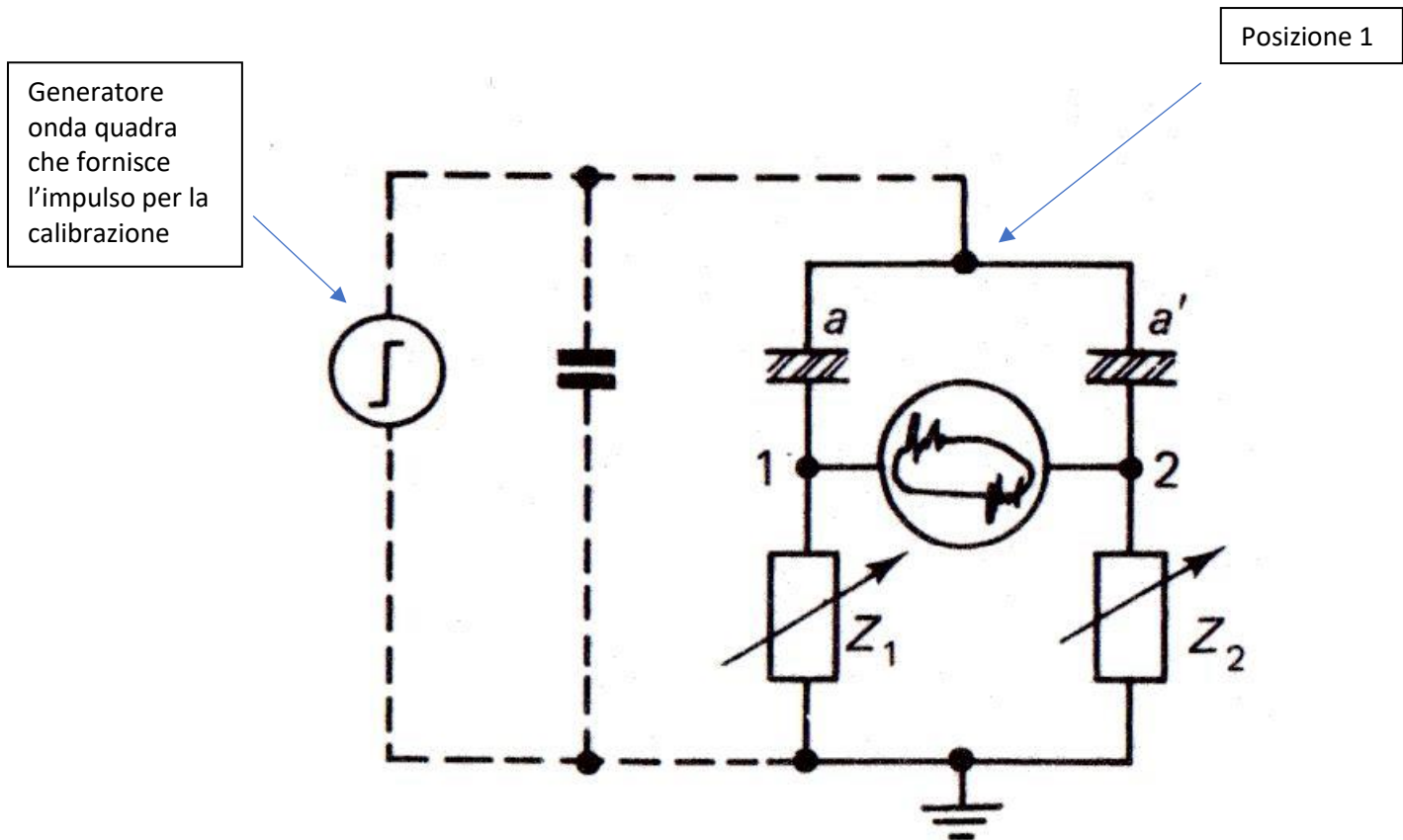


Figura 3.7: Procedura di bilanciamento [Fonte11]

Nel ponte viene applicato un impulso di valore elevato e le impedenze Z_1 e Z_2 , il quale sono composte da una resistenza e una capacità variabile in parallelo per convenienza, sono modificate per ottenere la risposta minima del rilevatore ovvero si modificano i parametri del ponte in modo da avere tensione nulla sui punti 1-2 (posizione 1 figura 3.6) [Fonte11].

Fatto ciò si esegue la vera calibrazione del provino iniettandoli una carica nota (posizione 2 figura 3.6) e si calcola il grado di reiezione m attraverso il rapporto tra la deflessione verticale del rilevatore nella posizione 2 e la deflessione verticale nella posizione 1.

La rilevazione bilanciata presenta il vantaggio di poter sopprimere i rumori ed inoltre si può dire che:

- La rilevazione della scarica può essere aggiustata in presenza di scariche esterne.
- Si è in grado di verificare l'origine della prima scarica variando il bilanciamento.
- Tale metodo può essere usato per la localizzazione delle scariche parziali.

Le caratteristiche che influenzano le prestazioni sono:

- Elevato grado di reiezione m (rapporto tra visualizzazione scarica esterna e quella interna) se a ed a' sono uguali.
- La risoluzione è data dal numero di impulsi di corrente di scarica che possono essere risolti in un quadrante dell'ellisse sullo schermo
- L'ampiezza e la forma dell'impulso di corrente.
- La sensibilità di misura di un oggetto di capacità a è simile a quella della risoluzione diretta e proporzionale alla radice di (a) se (a) è elevato.

La doppia calibrazione si rende necessaria se le due capacità (oggetto in prova e accoppiamento) sono diverse.

Se si inietta una carica di calibrazione in un punto del ponte essa corrisponde alla scarica dell'oggetto in prova:

$$q = (1 + n) * qc_{al} \quad (3.9)$$

Nel caso in cui le capacità fossero uguali $n = \frac{a}{a'}$ la formula 3.9 diventa:

$$q = 2 * qc_{al} \quad (3.10)$$

In questo modo la calibrazione può essere fatta internamente [Fonte11].

3.2 : TECNICHE ACUSTICHE PER IL RILEVAMENTO DELLE SCARICHE PARZIALI

I metodi di misurazione elettrici utilizzati per il rilevamento delle Scariche Parziali come abbiamo visto richiedono la presenza di più dispositivi collegati simultaneamente ed inoltre tali metodi presentano delle limitazioni quando sono applicati all'oggetto di prova con valori grandi di capacità e per test in loco.

I limiti che presentano sono riassunti qui di seguito:

- Richiesta di enormi apparati elettrici e sorgenti di tensione per le PD e la presenza di condensatori di blocco.
- Costosi dispositivi di schermatura per i laboratori di misura.
- Le misurazioni sul sito richiedono di arrestare una parte locale del sistema.
- Mancanza di controllo sul rumore di fondo.
- Basse sensibilità per misure su lunghi cavi e capacità di potenza.
- Difficoltà nel localizzare le sorgenti di scariche parziali.

Per cercare di ridurre queste limitazioni sono entrati in vigore i metodi di rilevamento acustico che stanno riscontrando importanza in quanto permettono di eseguire la diagnosi delle PD on-line.

I vantaggi di tali tecniche risiedono nel:

- i. Non sono distruttivi e invasivi.
- ii. Sono più facili e più veloci da installare sul sito.
- iii. Non è richiesta nessuna interruzione del sistema di alimentazione.
- iv. Possibilità di localizzare sorgenti di PD.

L'attività di una scarica parziale consiste nel rilascio di energia nel materiale colpito e crea un'esplosione nella quale scaturisce un'onda sonora.

Tale onda si propaga attraverso il mezzo materiale che racchiude la regione di emissione e successivamente si dilaga nello spazio circostante.

Un sensore ad elevata frequenza AE montato sulle pareti cattura le vibrazioni dell'onda e la converte in segnali elettrici venendo poi successivamente spediti in un sistema di elaborazione.

La forma del segnale rilevato dipende dalla sorgente, dal mezzo di propagazione, dallo strumento di rilevazione, e dal sensore AE¹³.

Tale principio è schematizzato dalla seguente figura:

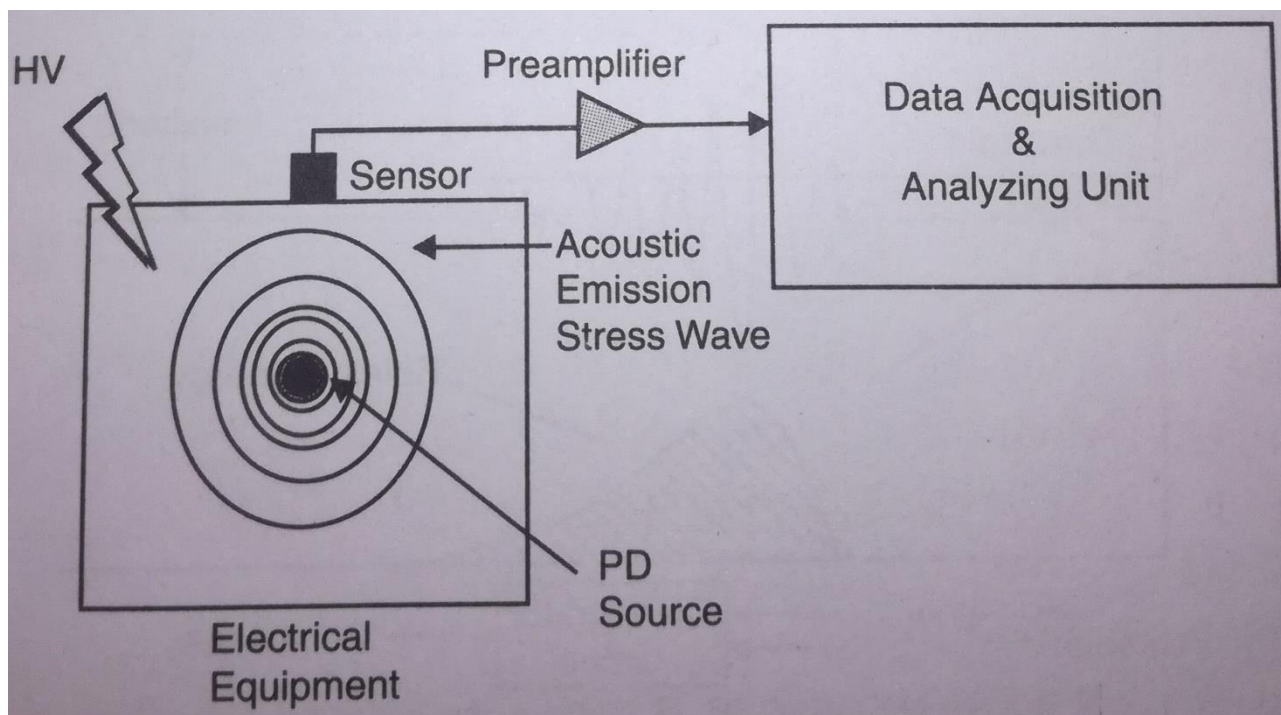


Figura 3.8: Schema di principio del sensore AE [Fonte13]

3.2.1 : PARAMETRI ACUSTICI:

I segnali acustici vengono misurati attraverso quantità come l'ampiezza, la frequenza, la durata, l'energia, tempo di salita, conteggio.

Per quanto specificato in riguardo alle grandezze analogiche e digitali di un AE vengono riportati in successione i parametri di cui si tiene conto:

- Densità numerica di scariche sopra una certa soglia.
- Ampiezza del segnale sopra la soglia impostata.
- Durata impulsi e tempo di salita.
- Energia in termini di area sotto l'involuppo del segnale rettificato.

Tali parametri sono rappresentati dalla seguente figura:

¹³ Fonte: "PARTIAL DISCHARGE BASED CONDITION MONITORING OF HIGH VOLTAGE EQUIPMENT" T.S Ramu, H.N Nagamani

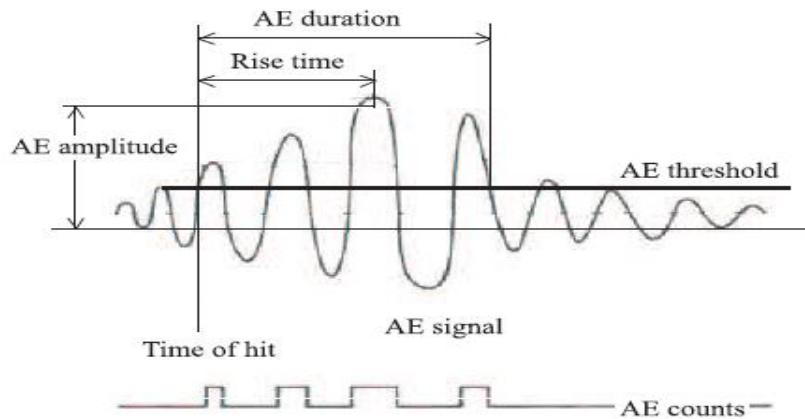


Figura 3.9: Tipica emissione di un segnale e parametri caratteristici [Fonte13]

L'ampiezza del segnale rappresenta un parametro molto importante nell'attività acustica essendo che permette di rilevare la possibile presenza di scariche parziali.

Un sistema software basato su tale tecnologia può produrre molti tipi di grafici tenendo conto appunto dei parametri considerati fino ad ora.

I dati ottenuti dalle misurazioni vengono elaborati in qualsiasi modo desiderato da un software personalizzato ed il sistema AE può rappresentare simultaneamente più visualizzazioni in tempo reale anche durante l'esecuzione degli esperimenti [Fonte13].

3.2.2 : SENSORI AD EMISSIONE ACUSTICA:

I sensori hanno il compito di assorbire l'emissione della scarica per convertirla successivamente in un segnale elettrico da inviare successivamente in un preamplificatore a livelli di tensioni richiesti.

Il segnale preamplificato viene spedito al modulo di misura che lo amplifica e lo filtra per ridurre la presenza di segnali di rumore.

Il processo di quantificazione è completato da un circuito comparatore il quale genera un impulso digitale di ampiezza scelto ogni qualvolta che il segnale acustico eccede una determinata soglia.

Il segnale acustico viene digitalizzato dall'hardware del front-end e viene spedito in un sistema informatico che fornisce l'archiviazione dei dati, una varietà di display grafici.

Per quanto concerne al sensore utilizzato esso è nella sua essenza un cristallo piezoelettrico il quale trasforma il segnale meccanico (compressione) in un segnale elettrico in uscita (tensione).

Il sensore piezoelettrico è un disco sottile di cristallo piezoelettrico metallizzato (ceramica) su entrambe le facce mediante contatto elettrico e incorporato in un cilindro metallico per migliorare la schermatura da interferenze elettromagnetiche [Fonte13].

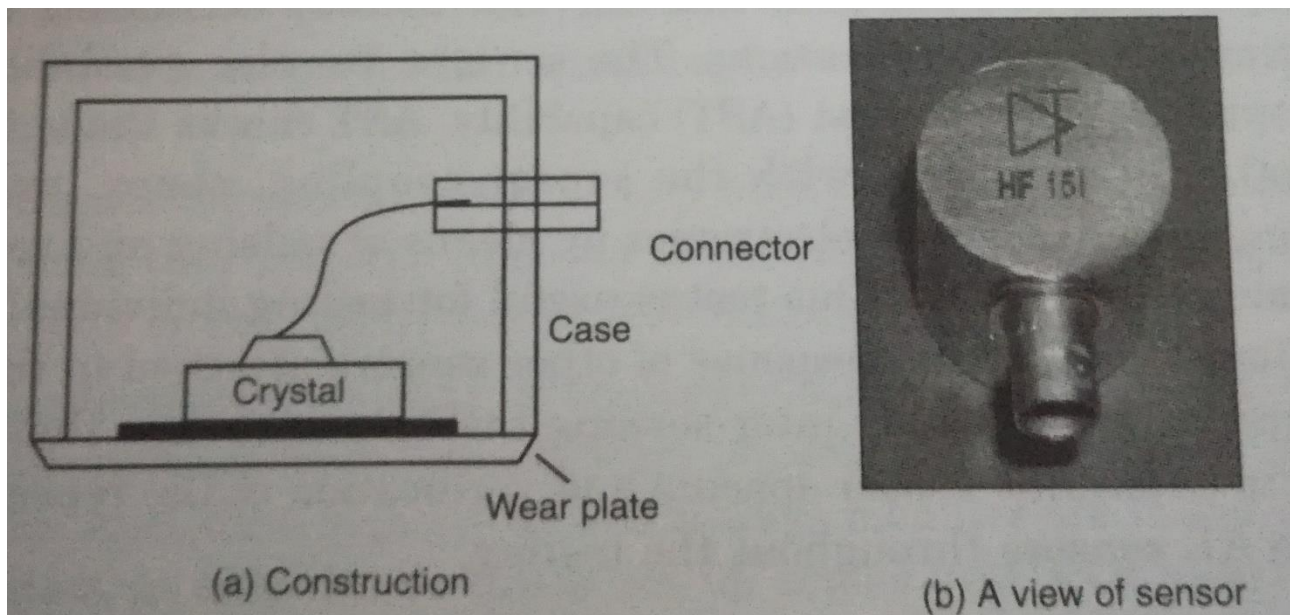


Figura 3.10: Sensore acustico [Fonte13]

La parte in ceramica è composto da titanati e zirconati di bario ed è reso piezoelettrico mediante somministrazione di carica.

Questo processo permette il riscaldamento del materiale a temperature superiori al suo punto di Curie quando viene sottoposto ad un intenso campo elettrico.

Il cristallo viene depositato in un involucro di metallo dove all'interno è presente un connettore come mostrato in figura 3.10 [Fonte13].

3.2.3 : COMPOSIZIONE DI UN SISTEMA AE

Un sistema di rilevazione acustica deve essere configurato per eseguire le seguenti attività:

- Rilevare le emissioni acustiche
- Localizzare la sorgente di emissione acustica
- Fornire strumenti capaci di discriminare il segnale di interesse dalla presenza di rumori

Un sistema AE è composto da sistemi computerizzati capaci di controllare e far operare il sistema stesso e da sistemi di acquisizione e moduli di archiviazione ottenendo nel suo complesso un sistema autonomo.

Il monitoraggio dell'evento viene gestito da un processore centrale che permette di coordinare simultaneamente diverse attività come l'archiviazione dei dati, visualizzazione e comunicazione dell'operatore.

Le caratteristiche ottenute dal segnale in forma numerica vengono memorizzati nei dischi e offrono capacità analitiche post-misurazione illimitate.

I sistemi AE utilizzati per i trasformatori di potenza o altri dispositivi elettrici sono basati su PC multi-canale e tutt'oggi i sistemi sono di natura digitale, multi-canale e computerizzati.

Un tipico sistema AE è rappresentato dalla seguente figura:

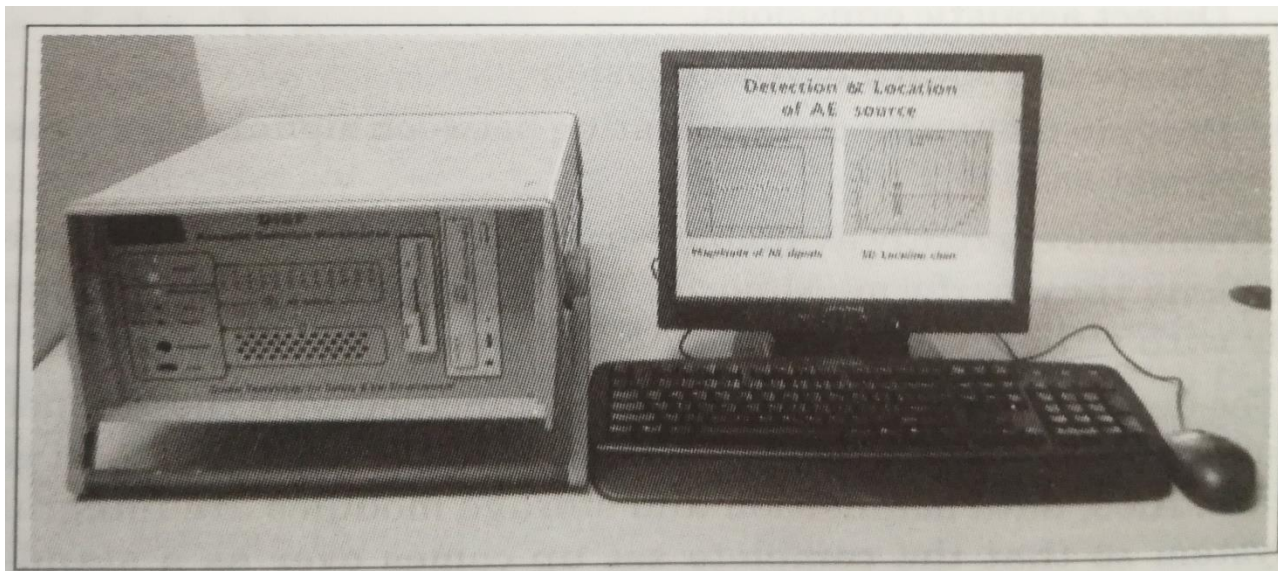


Figura 3.11: Sistema AE[Fonte13]

Mentre un esempio di diagramma a blocchi di un sistema AE a quattro canali è rappresentato dalla seguente figura:

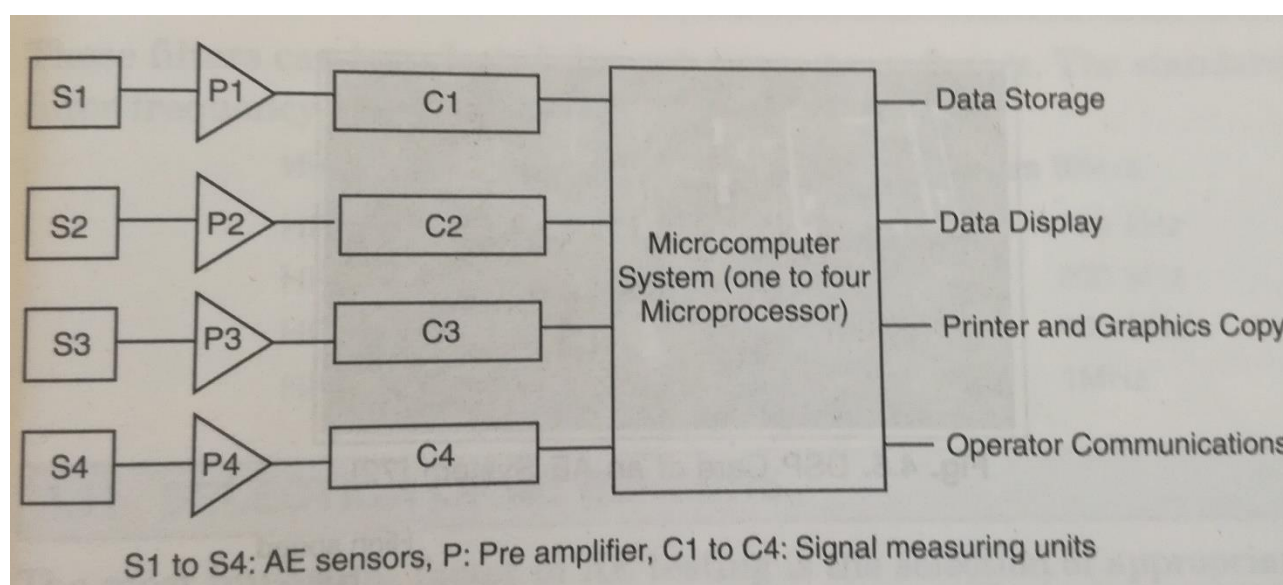


Figura 3.12: Diagramma a blocchi di un sistema AE a quattro canali [Fonte13]

La parte più importante di un sistema AE è la scheda di elaborazione del segnale che ha il compito di eseguire l'elaborazione parallela del segnale digitale (DSP).

Le caratteristiche principali di questo tipo di sistema sono i seguenti:

- 1) Ogni scheda elabora i segnali digitali provenienti dai diversi canali.
- 2) Componenti periferiche interconnesse (PCI) in configurazione bus forniscono velocità di trasferimento dati fino a 132 Mega bit al secondo al computer.
- 3) Il convertitore A/D a 16 bit, ha una frequenza di clock di 10 MHz.
- 4) E' composto da filtri passa-basso e filtri passa-alto.
- 5) Elevate prestazioni con indice fino a 32 bit
- 6) Circuito di test del sensore automatico integrato che fornisce impulsi generati e controllati per mezzo di un software munito di sensori.
- 7) Software personalizzato per misure in tempo reale, analisi, visualizzazioni e accumulo di dati.

Grazie all'evoluzione della tecnologia sono disponibili sul mercato sistemi AE aventi canali fino a 8,16,24 o 56 canali in un singolo involucro con PC integrato [Fonte13].

Un esempio di sistema DSP e un tipico schema a blocchi di una scheda DSP sono mostrati nelle seguenti figure:

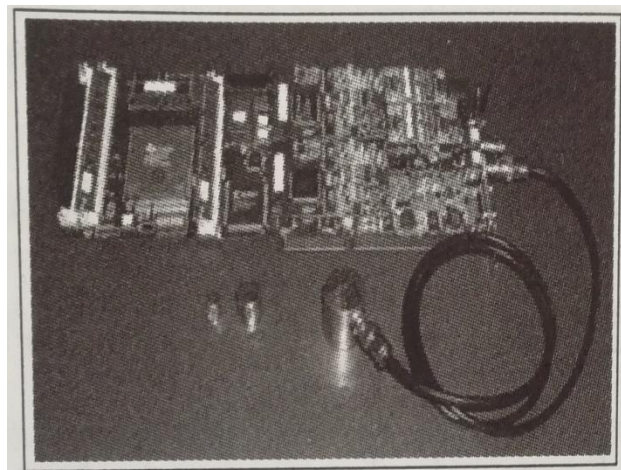


Figura 3.13: Scheda di un DSP[Fonte13]

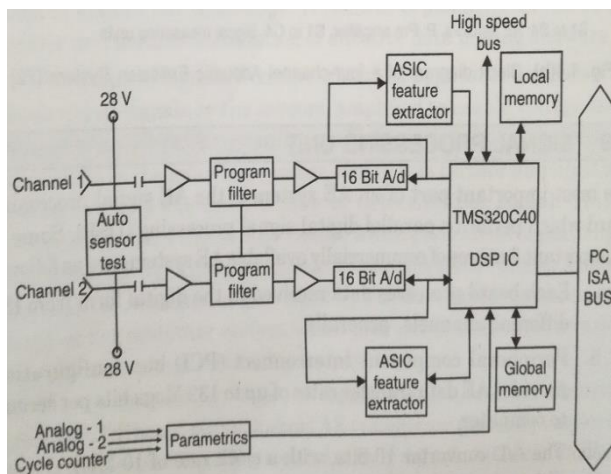


Figura 3.14: Schema a blocchi di un DSP [Fonte13]

3.2.4 : CALIBRAZIONE DEL SISTEMA AE:

Per la calibrazione di un sistema AE viene utilizzato un calibratore commerciale il quale genera un'onda di riferimento con ampiezza definita, frequenza e tempo di salita che possono essere monitorate con un oscilloscopio.

La forma d'onda di riferimento viene spedita a ciascun canale del sistema AE per confrontare l'ampiezza e la frequenza per differenti livelli di dB.

Un esempio tipico di un calibratore è rappresentato dalla seguente figura:

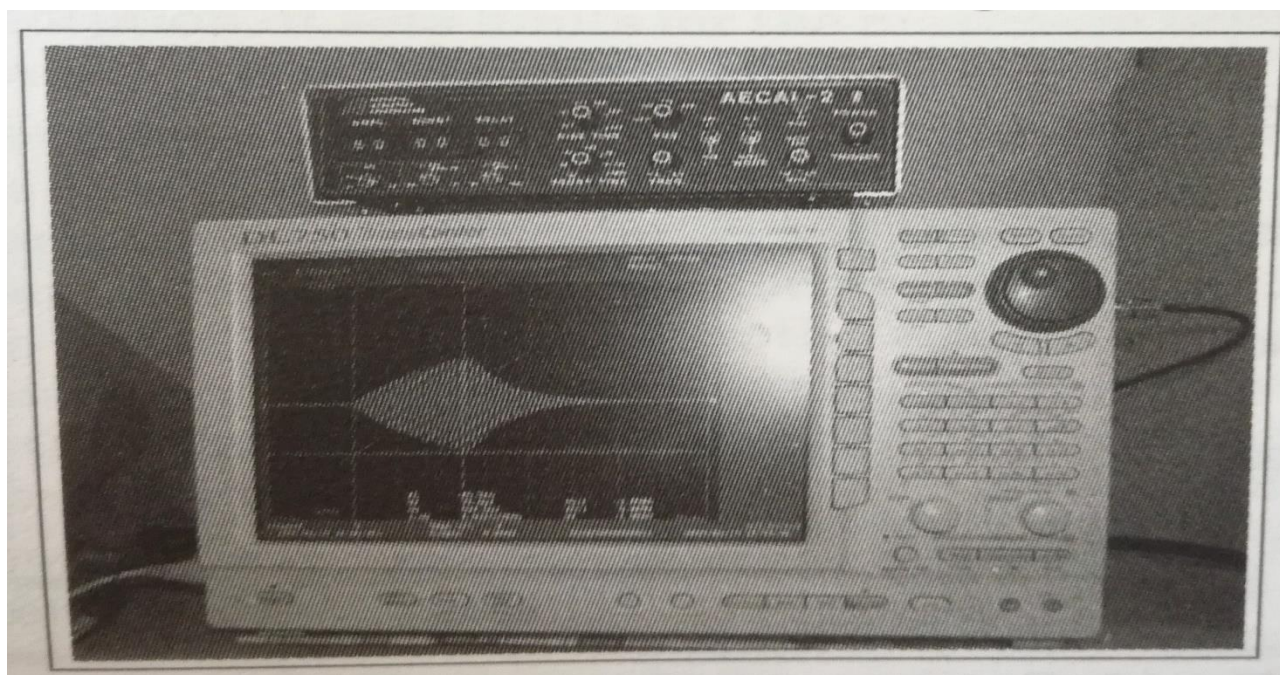


Figura 3.15: Tipo di calibratore utilizzato per i sistemi AE[Fonte13]

Le ampiezze misurate sono accettate tenendo conto di una tolleranza di ± 2 dB per i test acustici sulle PD. Esempi di risultati ottenuti da un processo di calibrazione sono invece mostrati dalle seguenti figure:

Characteristics of reference wave from AE calibrator			Measured values with oscilloscope	
Amplitude, dB	Amplitude, Equivalent volt	Frequency	Amplitude, Volt	Frequency
30	3.98 mV	150	3.8 mV	152
60	100 mV	150	105 mV	151
80	1 V	150	1030 mV	152

Calibrator: AE mode, AE System parameters: PDT = 50μS,
HDT = 100μS, HLT = 100μS.

Amplitude from calibrator	Amplitude measured at different channels, dB															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16	
	30 dB	30	30	31	30	31	30	30	29	30	30	31	30	30	31	
	60 dB	59	59	60	59	59	60	60	60	59	60	60	60	59	60	
	99 dB	99	99	99	99	99	99	99	99	98	99	99	99	99	98	99

Figura 3.16: Dati di calibrazione per un sistema AE[Fonte13]

3.2.5 : PROCESSO DI PROPAGAZIONE DEL SEGNALE ACUSTICO:

Nel processo di misura delle scariche parziali per mezzo di dispositivi acustici riveste importanza la forma del segnale ricevuto dal sensore in termini di attenuazione e velocità d'onda.

L'attenuazione è un fattore importante perché regola la rilevabilità a distanza ed è quindi un fattore utile nella scelta della posizione dei sensori.

Prima di eseguire un test sulle scariche parziali vengono prima fatte procedure di misurazione dell'attenuazione in modo da definire la distanza consentita del sensore in base a tali misurazioni.

L'altro fattore come la velocità d'onda del segnale viene tenuto conto quando le tecnologie acustiche vengono utilizzate per rilevare le sorgenti locali di scariche parziali.

Le proprietà acustiche di un materiale dipendono dalla composizione del materiale e dal processo utilizzato per produrlo.

Durante l'attività di una scarica parziale nel vuoto in un isolante solido immerso in un mezzo liquido isolante in un involucro di metallo, l'emissione acustica passa sia attraverso il solido che nel liquido isolante attraversando lo spessore dell'involucro prima di raggiungere i sensori accoppiati e posizionati alla parete esterna.

Così facendo il segnale raggiunge il sensore subendo cambiamenti notevoli, attenuazioni, distorsioni e ritardo a seconda delle proprietà del materiale il quale limita l'efficienza complessiva dei sistemi di rilevazione acustica di PD.

Dunque le caratteristiche di un segnale AE sono dipendenti dalla sorgente di segnale generato, dalla sua posizione e dal percorso fatto dal segnale per raggiungere il sensore [Fonte13].

3.2.6 : LOCALIZZAZIONE DELLE SCARICHE PARZIALI:

La capacità dei sistemi di rilevazione acustica di individuare la sorgente di scarica parziale è una caratteristica tale da far guadagnare maggior importanza a tali tecniche rispetto alle tecniche elettriche utilizzate per la misurazione delle PD.

La sorgente di emissione acustica viene localizzata misurando il tempo di ritardo tra due o più sensori posti sulla zona di interesse e inoltre richiede la conoscenza della velocità di propagazione dell'onda sul mezzo.

Mediante un input fornito dall'operatore, il software integrato nel sistema AE individua direttamente la fonte.

Per definire la posizione grafica della sorgente AE i sensori ricevono i segnali ad emissione acustica attraverso la massima ampiezza del segnale, il tempo di ritardo e le coordinate(x,y,z) stimate dal sistema AE.

Un esempio di tali informazioni è rappresentato dalla seguente figura:

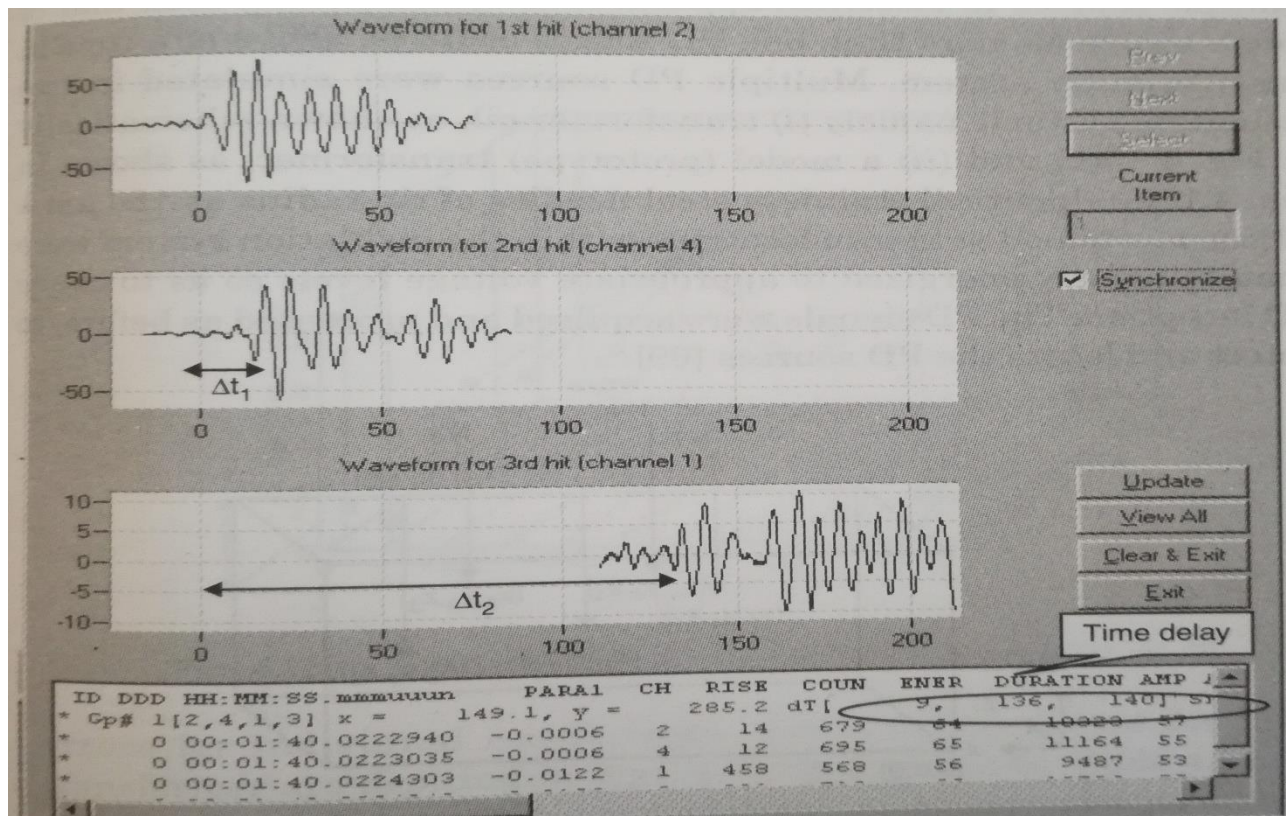


Figura 3.17: Forma d'onda registrata con ritardo per stimare le coordinate delle sorgenti di PD [Fonte13]

Negli isolanti elettrici l'emissione acustica da parte di sorgenti di scariche parziali attraversa differenti strati di materiale prima di raggiungere il sensore.

L'attenuazione e la velocità d'onda sono proprietà caratteristiche della AE e dipendono dalla direzione e spazio percorso.

ACCURATEZZA:

Per quanto riguarda l'incertezza delle coordinate misurate rispetto a quelle effettive si considera un indice indicativo del $\pm 10\%$.

Ci sono differenti cause che possono scaturire errori nella rilevazione delle sorgenti di scariche parziali tra cui:

- Mancata corrispondenza tra la velocità attuale e selezionata dei segnali AE.
- Attenuazione, riflessione e dispersione del segnale AE.
- Presenza di rumore.
- Coordinate sensoristiche errate [Fonte13].

3.2.7 : CONFRONTO TRA METODI ELETTRICI E METODI ACUSTICI

I metodi elettrici e acustici vengono utilizzati simultaneamente per le misurazioni di PD per registrare contemporaneamente entrambe le misure in modo tale da creare un sistema di calcolo in grado di correlare le misure elettriche con le misure acustiche.

Come esempio pratico di applicazione sia dei metodi elettrici che dei metodi acustici si considera un prototipo di un trasformatore dove i sensori AE sono stati posizionati sulla superficie esterna del trasformatore come è rappresentato dalla seguente figura [Fonte13]:

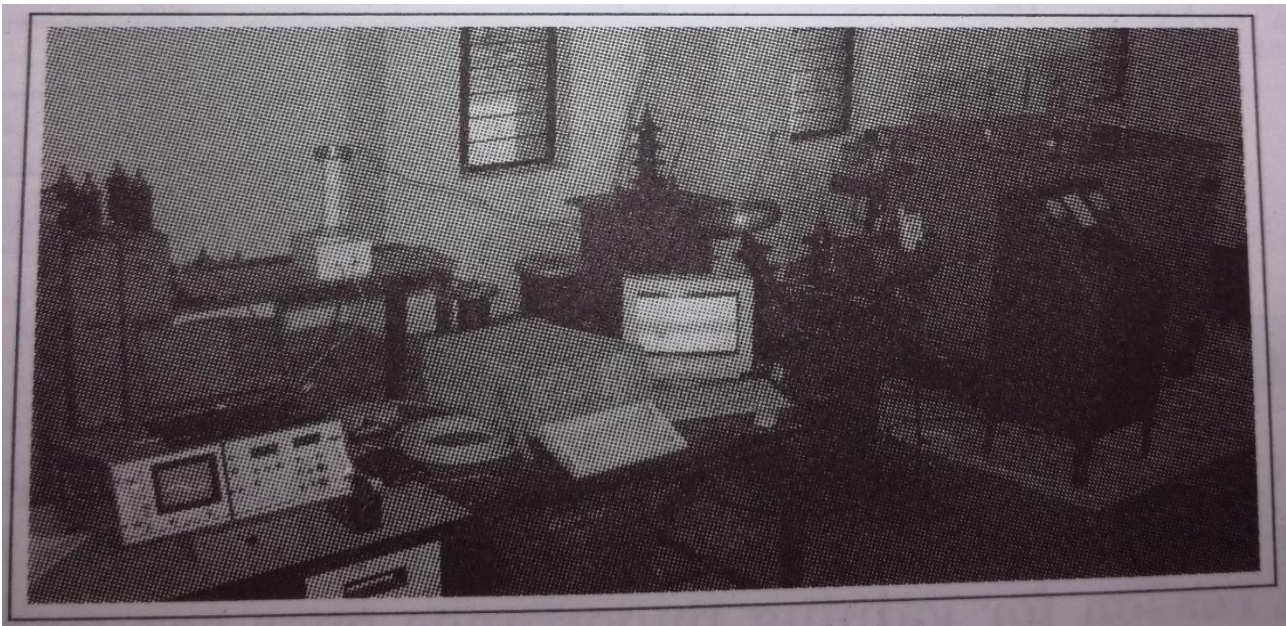


Figura 3.18: Circuito per la realizzazione delle misure di PD [Fonte13]

Le scariche parziali elettriche sono misurate in pC mentre quelle acustiche in dB e le forme d'onda ottenute da entrambi i metodi utilizzati sono mostrati dalle seguenti figure:

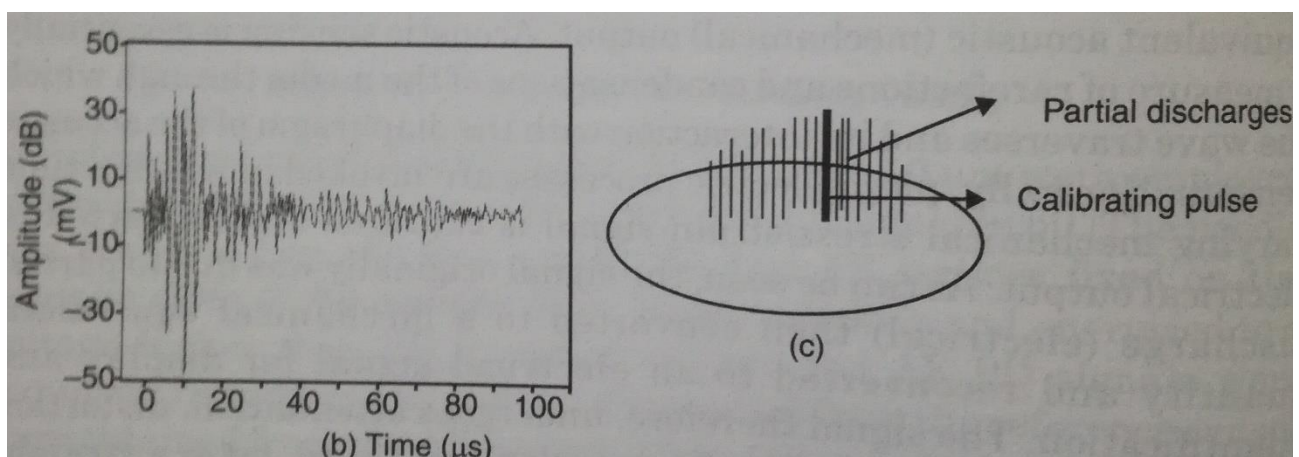


Figura 3.19: Grafici: (b) Forma d'onda di PD ottenuta da misure acustiche, (c) Impulsi elettrici di PD [Fonte13]

Le tabelle di misurazione ottenute da entrambi i metodi espressi in funzione della tensione applicata sono presentate dalla seguente figura:

Applied voltage, kV	Amplitude of electrical PD (max), pC	Magnitude of acoustic PD (max), dB
10	<100	< 35
12	550	48
14	800	50
16	1200	82
18	1500	85
20	2000	89

Figura 3.20: Dati ottenuti da misure elettriche e acustiche [Fonte13]

Dai risultati ottenuti si dimostra l'adeguatezza della scelta del metodo di prova e quella dei sensori AE utilizzati nelle misurazioni [Fonte13].

3.2.8 : RIPETIBILITA' DEI TEST:

La verifica della ripetibilità e riproducibilità dei test sono requisiti essenziali per i sistemi di misurazione AE i quali sono regolarmente applicati nei siti e hanno una periodicità di verifica bi-annuale.

Un campione di riferimento deve essere identificato per la calibrazione periodica e per il controllo relativo alla ripetibilità dei test di sistemi AE e per una riproducibilità soddisfacente i valori misurati possono differire di $\pm 3dB$.

Un esempio tipico di tali misure condotte su un campione di riferimento è rappresentato dalla seguente tabella:

Reference test sample	Sensor used	Test voltage	Initial acoustic PD		Repeat measurement after one year	
			January	July	January	July
Prototype transformer	DT15I	20 kV	75 dB	76 dB	74 dB	76 dB

Figura 3.21: Dati relativi a misure periodiche per due anni consecutivi [Fonte13]

3.3 DIAGNOSTICA DELLE SCARICHE PARZIALI NEI TRASFORMATORI, MOTORI e CAVI:

Quando si parla di diagnostica si intende l'utilizzo di tecniche utili ai fini di determinare la natura del mal funzionamento di una macchina attraverso la valutazione di alcuni parametri correlati al malfunzionamento.

L'importanza della diagnostica sussiste nel:

- Identificare la causa del malfunzionamento del sistema
- Prevenire la nascita di guasti
- Ridurre i costi per fuori servizio delle apparecchiature
- Programmare interventi di manutenzione e sostituzione dei dispositivi

La diagnostica deve essere capace di rilevare il problema del malfunzionamento senza aggiungere ulteriori ispezioni intrusive all'oggetto in esame e quindi ulteriori costi aggiuntivi.

Quando si esegue una diagnostica si devono effettuare i seguenti passi:

- 1: Acquisizione Dati
- 2: Elaborazione Dati
- 3: Presa di decisione

Le tecniche diagnostiche utilizzate hanno un diverso approccio di applicazione che si differenziano in diagnostiche:

- ON-LINE: consiste nel monitoraggio continuo di alcune grandezze durante il funzionamento dell'oggetto in prova.
- OFF-LINE: monitoraggio di alcune grandezze caratteristiche dell'oggetto di prova a intervalli di tempo stabiliti e oggetto di prova fuori servizio¹⁴.

La diagnostica applicata alle macchine elettriche permette di valutare lo stato di funzionamento attuale della macchina ovvero in "real time" e quindi può permettere di decidere se la macchina può ancora continuare a funzionare oppure è necessario cambiarla.

La diagnostica inoltre dovrà essere in grado di prevedere il comportamento della macchina in analisi anche per applicazioni future in modo da garantire il suo continuo utilizzo.

Nell'ambito delle macchine elettriche la diagnostica è legata a concetti fondamentali che tengono conto della sicurezza del sistema e del suo continuo funzionamento.

I concetti fondamentali a cui fa riferimento la diagnostica sono:

- 1)AFFIDABILITA': quando si parla di affidabilità di un sistema complesso(es.macchina) si intende la misura della probabilità che l'assieme considerato non si guasti in un specifico intervallo di tempo
- 2)PROTEZIONE: quando si parla di protezione si intende sistemi o apparecchiature di manovra capaci di rilevare la presenza di guasti in un sistema elettrico o macchina in modo da garantire condizioni di sicurezza durante il suo funzionamento.
- 3)MANUTENZIONE: la manutenzione consiste in una serie di operazioni atte a sostituire alcuni componenti del sistema elettrico o della macchina ai fini di riportare le condizioni di funzionamento dell'intero sistema.

La manutenzione si suddivide in:

-**Manutenzione Reattiva:** consiste nell'intervento dovuto ad un malfunzionamento della macchina o guasto completo con susseguente interruzione della stessa.

¹⁴ Fonte: Tesi di Laurea magistrale: " SISTEMA DIGITALE PER IL RILIEVO DELLE SCARICHE PARZIALI IN BANDA ULTRA LARGAIN TRASFORMATORI ISOLATI IN RESINA EPOSSIDICA". Luca Bottega

-Manutenzione Preventiva: permette di individuare componenti critici di una macchina e provvede a sostituirli indipendentemente dalle loro condizioni.

-Manutenzione predittiva: attraverso misure e analisi eseguite su una determinata macchina, il suo scopo è quello di determinare le reali condizioni di funzionamento dei componenti dell'intera macchina o di un suo sottoinsieme.

-Manutenzione Pro-Attiva: consiste nell'esecuzione di interventi di revisione finalizzata nel migliorare il valore o la prestazione di un sistema o di un suo sottoinsieme.

4) **MONITORAGGIO DELLE CONDIZIONI:** per monitoraggio delle condizioni si intende il continuo controllo del sistema e delle sue apparecchiature durante il suo ciclo di vita. Il monitoraggio viene utilizzato per permettere di prevedere la possibile nascita di guasti nel sistema¹⁵.

La norma a cui si fa riferimento per la misura delle scariche parziali in ambito industriale è la norma CEI EN 60270.

La Norma CEI EN 60270 viene applicata a sistemi di misura delle scariche parziali nelle apparecchiature, nei sistemi elettrici con tensioni alternate fino a 400 Hz e tensioni continue.

La Norma stessa definisce i termini impiegati nelle misure di scariche parziali, le grandezze da misurare, i circuiti di prova e di misura che possono essere usati e anche metodi di misura di tipo analogico o digitale, metodi di taratura per gli strumenti utilizzati e fornisce suggerimenti su come discriminare le scariche parziali dalle sorgenti esterne¹⁶.

Tale Norma fornisce indicazioni aggiuntive sui metodi elettrici utilizzati per le misure di scariche parziali impulsive ed anche sui metodi non elettrici utilizzati nella localizzazione delle scariche parziali e nella diagnostica delle scariche parziali.

Quando si parla di diagnostica applicata alle scariche parziali si intende lo studio del fenomeno della scarica in sé per poterne discriminare il tipo ed anche se è possibile la sua stessa sorgente.

Le tecnologie diagnostiche applicate alle scariche parziali permettono inoltre di stabilire se il fenomeno è di natura interna od esterna e quindi si riesce a capire se tale fenomeno pregiudica o meno la vita del componente colpito.

Vengono utilizzati in ambito diagnostico sistemi di misura in Banda Ultra Larga per lo studio delle scariche parziali e presentano ampiezze che vanno dalle decine di kHz ai 50 MHz a seconda della casa produttrice.

Tali sistemi permettono di rilevare la forma d'onda dell'impulso di corrente di scarica parziale passando alla funzione di trasferimento del sistema in esame permettendo di determinare la sua natura e la sua sorgente.

La misura di scarica parziale per scopo diagnostico viene eseguita attraverso tre fasi operative distinte:

- 1) Misura vera e propria della grandezza
- 2) Riconoscimento del fenomeno
- 3) Interpretazione dei risultati

3.3.1 MISURE DI SCARICHE PARZIALI NEI TRASFORMATORI e RELATIVE TECNICHE DIAGNOSTICHE:

¹⁵ Fonte: "DIAGNOSTICA DI MACCHINE E AZIONAMENTI ELETTRICI", Lucia Frosini, Università di Pavia

¹⁶ Fonte: Tesi di laurea magistrale: "SISTEMA DIGITALE PER IL RILIEVO DELLE SCARICHE PARZIALI IN BANDA ULTRA LARGA IN TRASFORMATORI ISOLATI IN RESINA EPOSSIDICA", Luca Bottega, Unipd

I trasformatori sono macchine elettriche statiche che hanno il compito di distribuire l'energia elettrica a differente tensione proveniente da diversi sistemi elettrici.

I trasformatori isolati in olio hanno un sistema di isolamento costituito dall'olio stesso e da un isolamento che è composto sostanzialmente di carta e legno contenente cellulosa.

Durante il suo funzionamento il trasformatore è sottoposto a differenti sollecitazioni come le sollecitazioni elettriche, dovute alla tensione e frequenza di esercizio, sollecitazioni meccaniche, dovute alle vibrazioni, quelle termiche, dovute alle correnti circolanti negli avvolgimenti e infine quelle ambientali, dovute alla contaminazione e alla temperatura ambientale.

La presenza di imperfezioni di lavorazione così come la presenza di impurità o umidità nel trasformatore può causare una riduzione della sua capacità di isolamento.

Nei trasformatori isolati in olio la presenza di questi fenomeni può comportare una riduzione delle prestazioni ed inoltre può far scaturire la nascita di scariche parziali all'interno del trasformatore.

Un modo per ridurre la presenza di scariche parziali nel trasformatore è quello di eseguire un buon design del sistema di isolamento e cercare di prestare attenzione al processo di essiccazione e impregnazione della parte attiva.

Di seguito vengono presentati alcuni difetti che possono verificarsi nei trasformatori:

- Presenza di cavità nella laminazione della carta isolante
- Cavità nelle boccole
- Formazione di bolle dovute all'evoluzione del gas
- Particelle metalliche libere sospese nell'olio
- Umidità dovuta al degrado che si verifica durante il processo di essiccazione o fabbricazione
- Elettificazione statica causata dalla circolazione dell'olio che aumenta la concentrazione di cariche in una parte del sistema di isolamento
- Tracce di isolamento solido risultanti dalla propagazione degli scarichi¹⁷

I trasformatori per quanto possano essere progettati e fabbricati secondo i più alti standard saranno sempre soggetti a fenomeni di scarica parziale per le presenze di difetti di lavorazione e imperfezioni nel sistema di isolamento.

-METODI ELETTRICI DI MISURA:

I metodi di misura elettrici permettono di ottenere la misura della scarica facendo diventare lo strumento di rilevazione della scarica parte integrante del circuito di misurazione.

Le scariche vengono misurate in pC e per la misurazione si utilizzano come impedenze di rilevazione i circuiti RLC o RC.

Il circuito RLC è usato per agire in modalità di rilevamento a frequenza stretta mentre quello RC per una modalità di rilevamento a frequenza di banda.

Fondamentalmente i circuiti elettrici di misurazione si basano sul rilevamento della caduta di tensione sull'impedenza conosciuta causata dalla corrente di impulso generata dal circuito esterno al campione di prova.

L'impedenza Z_m è composta da resistenza, induttanza e da induttanza e capacità parassite inerenti al circuito.

Lo schema circuitale di misurazione è il seguente:

¹⁷ Fonte: "Study of Partial Discharge Measurement in Power Transformers", Jonatas Policarpo Amrico, Sèrgio Henrique Lopes Cabral, Stèfano Frizzo Stefenon

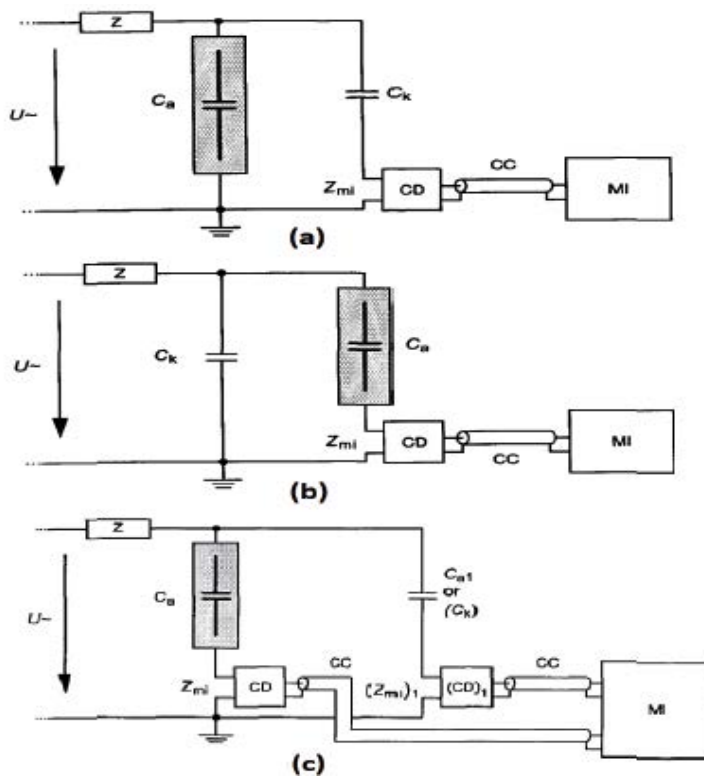


Figura 3.22: Circuiti base di misura: a) impedenza di misura in serie con la capacità di accoppiamento, b) impedenza di misura in serie con l'oggetto in prova, c) circuito di prova bilanciato [Fonte17]

Il sistema nel suo complesso è costituito da:

U: Alimentatore alta tensione

Zmi: Impedenza di misura

CC: Cavo di interconnessione

Ca: Oggetto di prova

Ck: Condensatore di accoppiamento

Cd: dispositivo di accoppiamento

MI: Strumento di misura

Z: Filtro

- Circuito a) Questo circuito viene utilizzato per eseguire la misurazione diretta essendo semplice da implementare. Il filtro o l'impedenza collegati tra la sorgente di alta tensione e l'oggetto di prova ha il compito di attenuare le interferenze create dalla sorgente.
- Circuito b) Tale circuito presenta la stessa semplicità di realizzazione del precedente ed in questo caso l'impedenza di misura risulta in serie con il terminale di terra dell'oggetto in analisi.

Questa configurazione ha una sensibilità superiore rispetto a quella precedente e viene utilizzata quando il lato di bassa tensione dell'oggetto in prova è isolata rispetto a terra.

- Circuito c) Questo circuito di misurazione comprende un circuito bilanciato, il misuratore PD viene collegato tramite due impedenze di misurazione.

In questa configurazione il circuito in bassa tensione dell'oggetto in prova e il condensatore di accoppiamento sono isolati dal riferimento di terra mediante le impedenze Z_{mi} e $(Z_{mi})_1$.

Tale circuito presenta vantaggi rispetto ai problemi di interferenza esterna, tuttavia, presenta difficoltà nella calibrazione e nell'equilibrio di sincronizzazione dell'attrezzatura di misura [Fonte17].

Tra i tre circuiti di misura presentati e proposti dalla norma IEC 60270 quello maggiormente più utilizzato è il circuito a) essendo che in questo caso il condensatore di accoppiamento impedisce alle componenti alla frequenza industriale di passare nell'impedenza di misura e costituisce un percorso alternativo agli impulsi di corrente corrispondenti alle PD.

La misura di scariche parziali nei trasformatori è ostacolata dalla complessità e inaccessibilità ai circuiti interni altamente induttivi.

Per ovviare a tale inconveniente il collegamento tra trasformatore e sistema di misurazione viene eseguito tramite i passanti del trasformatore come rappresentato nella seguente figura:

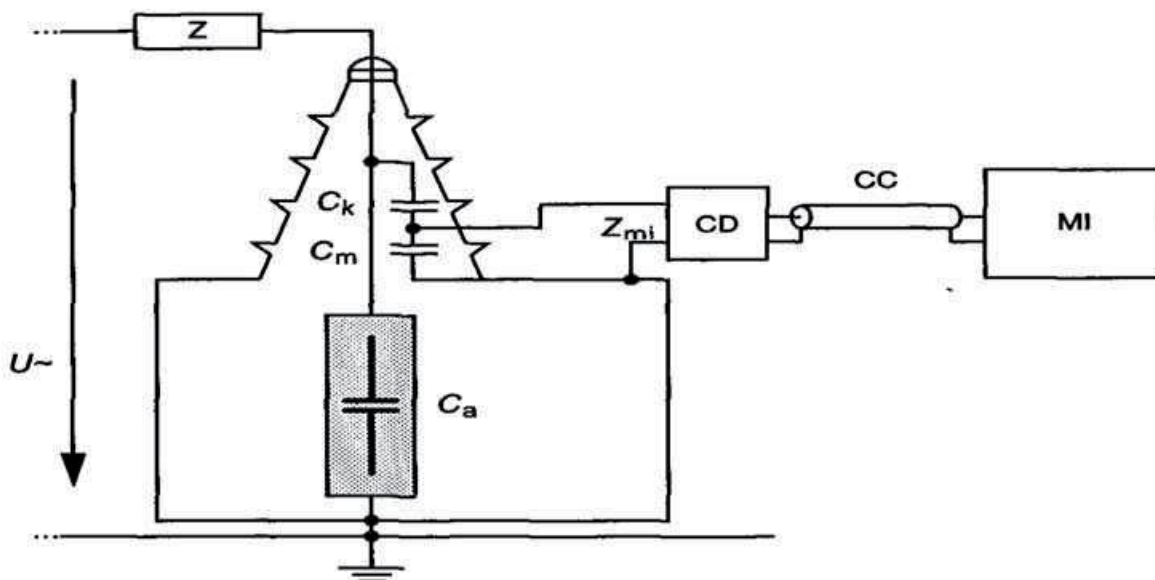


Figura 3.23: Circuito di collegamento tra passante e condensatore di accoppiamento [Fonte17]

Questa connessione viene effettuata solo quando l'apparecchiatura è spenta, essendo che si sta eseguendo una misura off-line, quindi tale procedimento si applica solo quando si ricevono trasformatori di fabbrica e quindi non è adatta per l'uso in campo diretto.

I metodi elettrici per il rilevamento e la misurazione delle PD hanno il vantaggio di quantificare l'intensità della scarica ma non permettono di identificare il tipo di scarica.

Grazie anche alla grande suscettibilità al rumore esterno tali metodi sono utili per applicazioni in luoghi controllati come i laboratori.

-METODI ACUSTICI:

Gli studi sulle propagazioni delle onde acustiche nei dielettrici ha permesso di sviluppare tecniche acustiche che sfruttano i rumori emessi dalla scarica parziale per verificare piccoli difetti nei mezzi isolanti.

Tali metodi tengono conto di alcuni parametri come l'impedenza acustica caratteristica, la velocità di propagazione dell'onda e l'assorbimento che l'onda acustica subisce quando si propaga.

Il segnale acustico generato da una PD in un trasformatore nasce dalla presenza di streamer che si formano all'interno delle cavità di gas e si propagano provocando microesplosioni di energia meccanica che si dilaga attraverso l'olio del trasformatore sotto forma di onde di pressione.

Le onde acustiche emanate dall'attività delle scariche parziali nei trasformatori si propagano in differenti direzioni fino a quando non vengono catturate dai sensori posizionati sulla carcassa esterna del trasformatore.

Il metodo utilizzato per il rilevamento della posizione della sorgente di scarica si basa sull'ora di arrivo dell'onda nel sensore e tutto viene parametrato in tre dimensioni.

I metodi acustici pertanto individuano l'attività delle scariche parziali emessi nei trasformatori in tre dimensioni misurando i segnali acustici emessi dalle scariche stesse. Un esempio di tale metodo viene mostrato dalla seguente figura in cui le posizioni XYZ sono le dimensioni del trasformatore mentre i punti da 1 a 14 rappresentano le posizioni dei sensori:

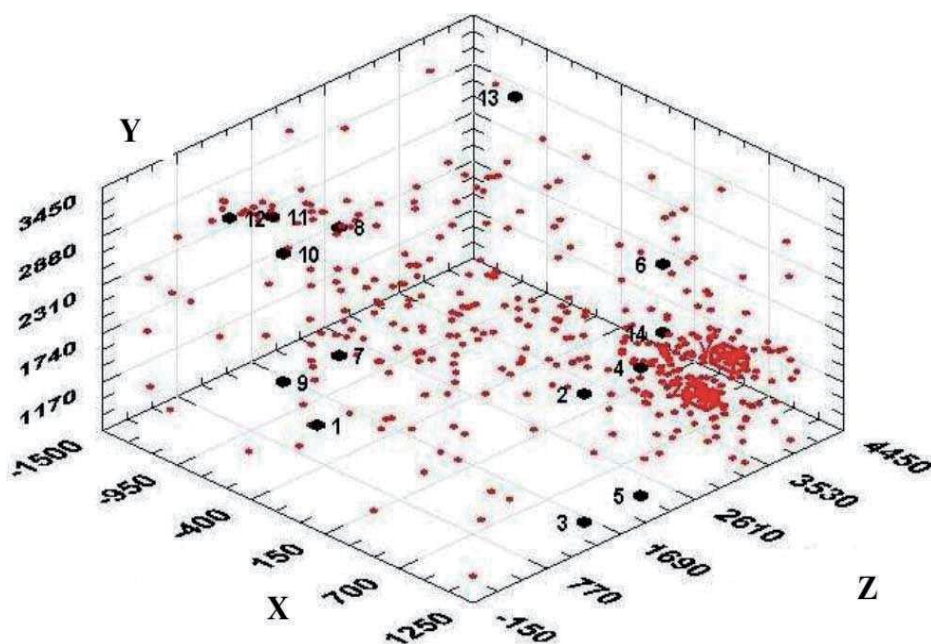


Figura 3.24: Rilevamento delle PD attraverso tecniche acustiche [Fonte17]

Un esempio invece di forma d'onda acustica emessa da una PD all'interno di un trasformatore è rappresentata dalla seguente figura:

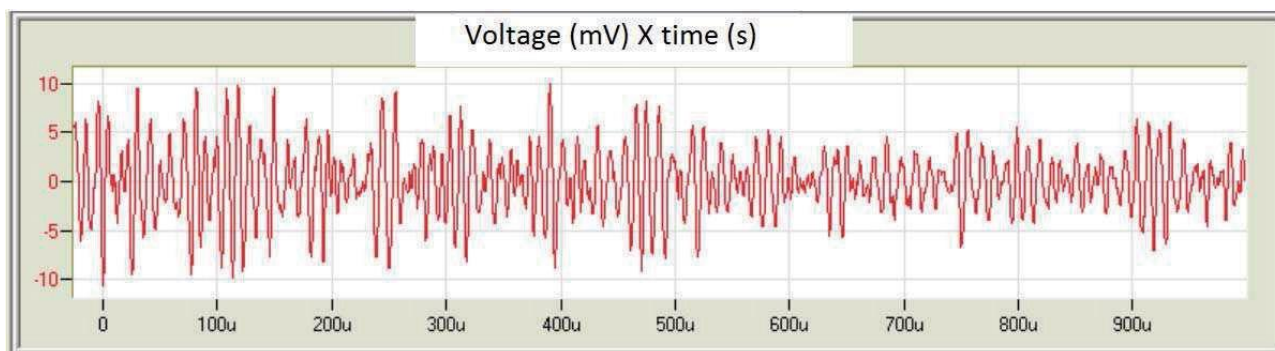


Figura 3.25: Tipica forma d'onda acustica emessa di una scarica parziale [Fonte17]

L'applicazione del sistema acustico per mezzo di rilevamento acustico può essere effettuato in due modi:

- 1) Utilizzo del sistema acustico composito che sfrutta la simultaneità delle misure acustiche ed elettriche provenienti dalle PD calcolando la differenza di velocità e tempo tra i due segnali in modo da ottenere la distanza tra il sensore e la sorgente di PD.

Il vantaggio del metodo sta nella conferma che il segnale raccolto dal sensore acustico è una PD e non una fonte di rumore tuttavia presenta anche lo svantaggio di non riuscire a ottenere un segnale elettrico privo di rumore. Questo metodo è più adatto per applicazioni in laboratorio a causa della necessità di arrestare le apparecchiature di rilevamento con il metodo elettrico.

- 2) Si basa su un semplice sistema acustico dove vengono installati numerosi sensori acustici esternamente all'apparecchiatura. Le informazioni ottenute dai sensori vengono confrontate in modo da calcolare la posizione delle PD. Riposizionando i sensori fuori dall'apparecchiatura è possibile migliorare l'accuratezza dei segnali catturati. Tale sistema è più adatto all'uso in campo a causa della sua immunità alle interferenze elettromagnetiche. Il rumore emesso dal nucleo del trasformatore presenta delle frequenze inferiori rispetto a quelle emesse dalle scariche parziali il che consente la loro separazione nelle misurazioni. Tale metodo risulta valido per test sui trasformatori direttamente sul campo.

Le onde acustiche si differenziano per la loro diversa propagazione nel materiale. Nel caso di materiale liquido le onde sono prevalentemente longitudinali mentre nei materiali solidi si propagano vari tipi di moto ondoso.

Per quanto riguarda i trasformatori in olio si ha la propagazione di onde trasversali e longitudinali per cui il sensore posto nella parte esterna del trasformatore deve essere in grado di rilevare entrambi i tipi di onde.

La temperatura dell'olio ha un'influenza inversamente proporzionale sulla velocità di propagazione dell'onda sonora.

Nei trasformatori la temperatura dell'olio varia in base al carico richiesto e tutto ciò ha influenza sul monitoraggio delle scariche parziali.

Il sensore posto esternamente nel trasformatore ha un'interferenza esterna rilevata trascurabile per quanto riguarda l'olio minerale.

Per quello che riguarda le PD originati da bolle di gas lo spettro di frequenze si estende nell'intervallo da 300 kHz a 2 MHz mentre nel caso di configurazione punta-piano lo spettro si estende non oltre i 300 kHz [Fonte17].

-METODO OTTICO o VISIVO:

Un metodo per rilevare sorgenti di scariche parziali consiste nell'osservare visivamente in ambienti bui le scariche.

In alternativa a tale metodo è possibile effettuare registrazioni fotografiche.

In casi eccezionali vengono utilizzati fotomoltiplicatori o ottimizzatori di immagini.

Tuttavia tali metodi non possono essere applicati nei trasformatori isolati in olio essendo che le PD avvengono al suo interno ad eccezione delle scariche corona che si possono verificare nelle boccole del trasformatore [Fonte17].

-METODO CHIMICO:

L'analisi dei gas disciolti o DGA (Dissolved Gas Analysis) è un metodo chimico utilizzato per analizzare l'olio isolante dei trasformatori mediante cromatografia.

La nascita di archi o PD può scaturire dal degrado dell'isolamento dei trasformatori immersi in olio isolante e tutto ciò provoca gas dovuti alla decomposizione dell'isolante.

Con la nascita della gascromatografia nel 1952 si rese possibile la separazione di gas che si erano formati nell'olio per effetto di una scarica elettrica, mentre nel 1960 l'uso della cromatografia venne applicato nell'identificazione di gas generati da archi elettrici nei trasformatori immersi in olio isolante.

I gas risultanti dalla decomposizione dell'isolante di un trasformatore vengono totalmente o parzialmente dissolti nell'olio e dopo un periodo di omogeneizzazione sono presenti in tutti i punti in cui è presente l'isolante.

I gas rilasciati da archi elettrici, PD o riscaldamento formati a seguito della decomposizione dell'isolante del trasformatore sono l'idrogeno, il metano, l'etano, l'etilene e l'acetilene.

Tali considerazioni hanno permesso di sviluppare diversi metodi di analisi per riconoscere l'insorgenza di scariche parziali, archi elettrici e altri tipi di guasti nell'isolamento dei trasformatori.

Il metodo DGA richiede una concentrazione di gas sufficiente per garantire la corretta identificazione, e potrebbe non essere praticabile nel caso di fonti iniziali di PD.

Si hanno situazioni in cui i metodi di diagnosi DGA mancano di omogeneità e tutto ciò fa scaturire una diagnosi complessa da elaborare portando a inesattezze nell'analisi.

Tale metodo, nonostante sia molto utilizzato dalle aziende brasiliane nel settore elettrico, compromette la scelta finale della macchina a riguardo di un suo riutilizzo o interruzione del suo operamento.

-METODO RIV:

Il metodo RIV ovvero il test della tensione di radio interferenza sfrutta il fenomeno delle onde elettromagnetiche generate dalle PD.

Il ricevitore converte il segnale acquisito in microvolt.

Tale metodo tuttavia non permette di individuare il punto di occorrenza della scarica ma in realtà è in grado di individuare il grado di manifestazione del fenomeno.

La misurazione RIV utilizzata sia per le apparecchiature ad alta tensione sia per le linee di trasmissione sfrutta un'antenna capace di captare interferenze in radiofrequenza generate dalle scariche.

METODO UHF:

Il metodo UHF (Ultra High Frequency) consiste in un sistema capace di rilevare onde elettromagnetiche con soglie di frequenza superiori alle centinaia di MHz che vengono emesse dalle PD.

Diversi ricercatori hanno studiato questo metodo per rilevare le PD nel gas SF₆.

Tale metodo inoltre è applicato con successo per il monitoraggio delle PD in una sottostazione isolata in gas GIS ma anche i trasformatori sono un potenziale bersaglio di questo metodo.

Per la localizzazione delle PD nei trasformatori si sfruttano tre coordinate spaziali sconosciute, pertanto, si utilizzano quattro sensori disposti attorno alla carcassa del trasformatore.

Un sensore fornisce un riferimento temporale mentre gli altri tre, in base al tempo di arrivo delle onde elettromagnetiche, forniscono variabili indipendenti per l'algoritmo di localizzazione delle PD.

A fronte di ciò è stato adottato un approccio alternativo in cui la struttura del trasformatore viene pre-elaborata tenendo conto degli effetti di propagazione e delle variazioni di velocità del segnale.

In quanto all'analisi si tiene conto dell'insieme di punti (posizione del sensore) associati alle differenze temporali in modo da ricercare risultati entro una tolleranza temporale definita.

Una tipica applicazione di tale metodo viene presentata nella seguente figura:

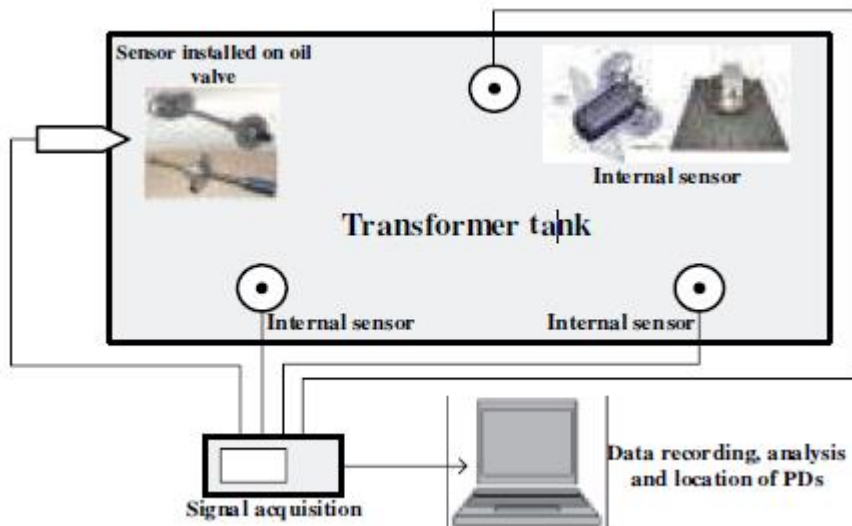


Figura 3.26: Tipico sistema di localizzazione delle PD tramite UHF [Fonte17]

L'algoritmo consiste di sensori collegati per mezzo di un multiplexer ad analizzatore di spettro ed un preamplificatore e da un oscilloscopio. Il controllo e l'archiviazione dei dati sono eseguiti da un computer.

3.3.2 MISURA e DIAGNOSTICA DELLE SCARICHE PARZIALI NELLE MACCHINE ROTANTI:

La misura delle scariche parziali nelle macchine rotanti è nella sua applicazione una diagnosi importante in quanto permette di valutare lo stato del sistema di isolamento della macchina e quindi permette di conoscere lo stato di affidabilità della macchina stessa.

I metodi di misurazione delle PD nelle macchine elettriche rotanti permettono di identificare i siti di scarica nel loro isolamento e inoltre sono metodi non invasivi.

Le sorgenti più comuni di scariche parziali nelle macchine rotanti sono riassunte di seguito:

- **Cavità gassose;** nel caso di statori isolati in nastro di mica e successivamente impregnati in resina.
- **Delaminazioni interne:** si verificano per imperfetto lavorazione del sistema isolante durante la realizzazione o per eccessivi stress meccanici o termici durante il funzionamento.
- **Delaminazione tra conduttore e isolamento:** generalmente dovute a stress termici elevati.
- **Scariche dentro cava:** sono causati dal danneggiamento dello strato semiconduttivo a causa di movimento del conduttore o della matassa all'interno della cava o all'esterno di essa.
- **Scariche superficiali nelle testate:** si tratta di un meccanismo lento e può coinvolgere il sistema isolante fase-terra o le fasi adiacenti.
- **Particelle conduttive:** possono essere dovute alla contaminazione dell'avvolgimento e causano forti concentrazioni di scariche parziali.
- **Propagazione dell'impulso entro gli avvolgimenti:** l'impulso di corrente associata alla scarica viene vista come un transitorio impulsivo in cui il tempo di salita si attesta in pochi nanosecondi.

All'interno delle macchine possono avvenire fenomeni di risonanza per effetto degli accoppiamenti capacitivi e induttivi dell'avvolgimento.

Rispetto agli altri metodi di misura come la misura di resistenza dell'avvolgimento di statore o del fattore di perdita, le misure di scariche parziali sulle macchine rotanti forniscono un quadro completo dell'intero avvolgimento delle singole fasi.

Per quanto concerne alla misura delle scariche parziali nelle macchine rotanti si fa affidamento al monitoraggio on-line delle scariche parziali in quanto le tecniche di misurazione off-line come il metodo di misura della potenza di perdita ed i metodi di rilevamento diretto e bilanciato non sono in grado di identificare la natura della scarica.

Nell'ambito del monitoraggio on-line i sistemi utilizzati sono progettati in base a soglie di frequenza a banda stretta o larga e permettono di fornire informazioni su ogni evento di scarica.

Gli impulsi delle PD hanno un tempo di salita tra 10 e 100 ns e soglie di frequenza che si estendono fino a 100 MHz per cui si ha una grande banda di frequenze da selezionare per il rilevamento¹⁸.

I filtri utilizzati dai rilevatori hanno una soglia di frequenze comprese tra 20 KHz e 300 KHz essendo che si è osservato che in tali soglie si ha una limitazione degli errori di attenuazione da un fattore da due a tre.

Le tecniche di monitoraggio on-line fanno affidamento a sensori capacitivi e induttivi.

I sensori capacitivi sono utilizzati per misurare la tensione mentre quelli induttivi per misurare la corrente.

Entrambi i metodi sfruttano un dispositivo di registrazione nel dominio del tempo per acquisire il segnale.

La tecnica capacitiva nominata anche tecnica di "sondaggio diretto" richiede il collegamento di sensori capacitivi come accoppiatori capacitivi ai terminali di macchina e tale metodo ha dimostrato di essere utile ai fini del rilevamento delle scariche parziali nelle macchine rotanti.

Un esempio di accoppiatore è lo **Stator Slot Coupler** che può essere utilizzato in simultanea con un sistema a banda ultra larga che permette di discriminare dei segnali di PD dal rumore nei generatori di turbine.

Per quanto riguarda le tecniche induttive esse sfruttano frequenze a banda stretta e utilizzano sensori induttivi come trasformatori di corrente a radiofrequenza o bobine di Rogowski.

Le tecniche di misure elettriche sono più suscettibili ai disturbi esterni ed inoltre le dimensioni della macchina possono comportare un'ulteriore limitazione del riconoscimento della scarica parziale in quanto la macchina può distorcere la forma d'onda della scarica e portare ad un errore di misurazione della stessa, tuttavia nonostante queste limitazioni le tecniche di misura elettriche sono tutt'ora usate.

Le tecniche di misurazione on-line come abbiamo detto prima utilizzano sensori capacitivi o induttivi a seconda dell'applicazione quindi ora spiegherò su quali principi si basano tali strumenti.

SENSORI CAPACITIVI:

I sensori capacitivi si basano sul rilevamento dell'energia del campo elettrico degli impulsi delle PD, tutto ciò è permesso grazie ad una struttura di elettrodo metallico o strati di fogli metallici aggiuntivi.

Tipiche caratteristiche di tali sensori sono:

- Adatto per misure on-line con apparecchiature portatili
- Non fornisce isolamento galvanico e tale sensore è soggetto ad alta tensione
- Si consiglia la preinstallazione
- Per installarlo la macchina deve essere spenta
- Presentano una sensibilità migliore rispetto a quelli induttivi

I tipici sensori utilizzati per il rilevamento delle scariche parziali nelle macchine rotanti sono:

¹⁸ Fonte: ON-LINE MEASUREMENT OF PARTIAL DISCHARGES IN HIGH VOLTAGE ROTATING MACHINES ABHIJIT R. JOSHI

1: L'ACCOPPIATORE CAPACITIVO

2: STATOR SLOT COUPLER

1: L'ACCOPPIATORE CAPACITIVO:

Quando avviene la scarica nell'avvolgimento di statore il transitorio elettrico si propaga verso i terminali di macchina.

Un circuito accoppiato al percorso di sviluppo sarebbe soggetto allo stesso fenomeno e quindi attraversato dallo stesso transitorio.

Per misurare tale transitorio un condensatore di accoppiamento viene inserito in tale circuito permettendo così di rilevare l'impulso di scarica ed inoltre è presente anche l'impedenza di misurazione.

L'accoppiatore capacitivo nel suo insieme è costituito da un filtro passa-alto in grado di attenuare le frequenze di rete.

Un tipico schema circuitale di tale configurazione è rappresentato dalla seguente figura:

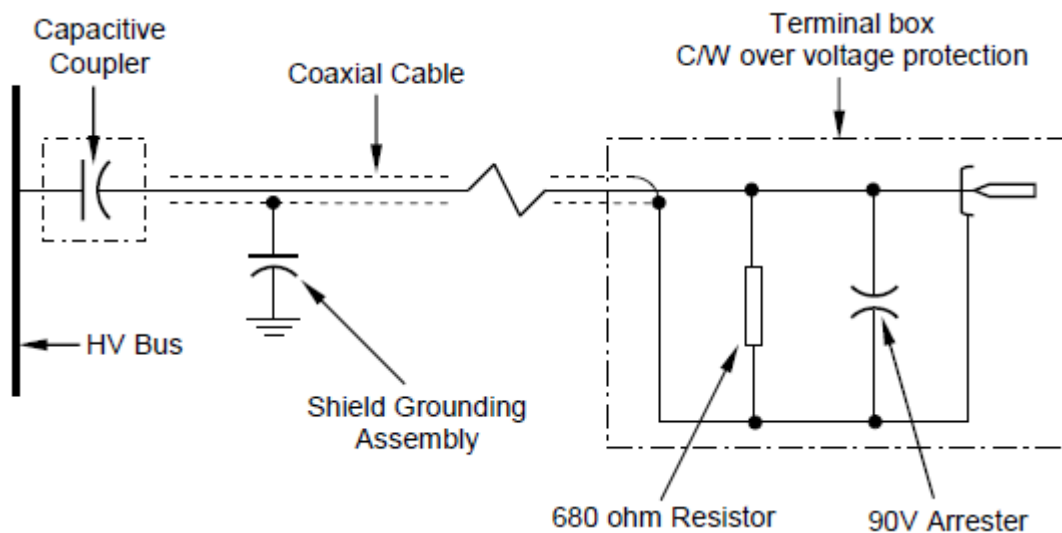


Figura 3.27: Schema elettrico di misura dell'accoppiatore capacitivo [Fonte18]

Il circuito converte il segnale di corrente di PD in segnale di tensione in modo da essere registrato per ottenere informazioni dettagliate del fenomeno.

I tipi di accoppiatori capacitivi che possono essere scelti dipendono dal tipo di applicazione e sono:

- Tipo di cavo
- Tipo incapsulato in mica epossidica

Gli accoppiatori in base al tipo di cavo sono i più frequentemente utilizzati essendo che hanno una tensione nominale superiore rispetto a quello in mica epossidica ed inoltre sono più grandi dimensionalmente e hanno un livello di temperatura inferiore.

Quello tipo mica ha una tensione inferiore e una temperatura elevata ed è anche più relativamente corto di dimensioni [Fonte18].

Generalmente si adotta un condensatore di accoppiamento per fase nella macchina mentre nel caso di motori o generatori turbo di grandi dimensioni sono installati due accoppiatori per fase.

A scapito di ciò è sufficiente un accoppiatore per fase in quanto la grande lunghezza dei cavi di collegamento attenua e filtra eventuali disturbi ad alta frequenza e ne impedisce l'ingresso nel circuito di misura.

Uno dei principali vantaggi di tale strumento è che ha una maggiore sensibilità rispetto alla bobina di Rogoski e alla HFCT (Radio frequency current transformer).

Il condensatore di accoppiamento è collegato ai morsetti in alta tensione della macchina quindi la sua integrità è cruciale per garantire le misurazioni ed inoltre non deve essere soggetto a fenomeni di scarica.

2: STATOR SLOT COUPLER:

L'accoppiatore dello statore o SSC è un nuovo tipo di sensore utilizzato per il rilevamento delle PD ed è principalmente utilizzato nei generatori di turbine di grandi dimensioni.

Lo SSC è un accoppiatore elettromagnetico a banda ultra larga.

Esso è un'antenna costruita su un piano di massa con uscite coassiali a ciascuna estremità ed è installato sopra le barre dell'avvolgimento di statore.

Sono installati sei SSC per coprire tutti gli avvolgimenti di statore e rileva qualsiasi segnale elettrico di gamma frequenziale da 10 MHz a 1000 MHz ed è molto sensibile ai segnali provenienti da fonti vicino all'SSC.

La doppia uscita dell'SSC permette di distinguere le PD dallo slot e PD dall'avvolgimento adiacente calcolando il tempo di arrivo dell'impulso ad entrambe le estremità.

Un vantaggio che offre tale strumento è che ha un'ampia larghezza di banda e si trova vicino alla fonte di scarica permettendo di eliminare le fonti di interferenza.

Essendo direzionali sono in grado di localizzare la fonte di scarica.

Lo SSC deve essere montato durante la fase di produzione ed inoltre per installarlo richiede un'interruzione della macchina.

L'SSC deve essere in grado di resistere alle condizioni alla quale è soggetto durante la fase di installazione.

Richiede materiali specializzati per la costruzione in quanto è soggetto a sollecitazioni termiche e meccaniche da parte della macchina rotante.

Un'immagine rappresentativa del sensore è la seguente:



Figura 3.28: Tipico sensore SSC [Fonte: Google]

SENSORI INDUTTIVI:

I sensori induttivi rilevano il campo magnetico generato dalla corrente d'impulso della PD.

L'accoppiamento induttivo può essere realizzato sfruttando un'antenna a campo magnetico, una bobina di Rogowski oppure un trasformatore di corrente.

I sensori induttivi presentano le seguenti caratteristiche:

1. E' adatto per misurazioni online
2. Fornisce isolamento galvanico
3. L'installazione non richiede l'interruzione della macchina
4. Rispetto alle sonde capacitive hanno una sensibilità ridotta
5. Può essere installato attorno ai cavi grazie alla semplicità di costruzione

-BOBINA DI ROGOWSKI:

La Bobina di Rogowski inventata nel 1912 da Walter Rogowski è in grado di rilevare il campo magnetico generato dalla corrente d'impulso del conduttore senza avere nessun contatto con esso.

Un nucleo non ferroso o una bobina a nucleo d'aria è posto attorno al conduttore in maniera toroidale in modo tale che il campo magnetico generato dalla corrente induca una tensione sulla bobina.

La tensione in uscita è proporzionale alla velocità di variazione della corrente e se tale tensione viene integrata si ottiene un'uscita proporzionale alla corrente.

La tensione indotta nella bobina è proporzionale alla derivata della corrente che fluisce nel conduttore e quindi si ha la seguente equazione:

$$v = \mu_0 * A * n * \frac{di}{dt} \quad 3.1$$

Dove:

- μ_0 : permeabilità dell'aria

-A: Area bobina

-n: numero di giri dell'avvolgimento

Il prodotto $\mu_0 * A * n$ è chiamata mutua induttanza M della bobina.

Gli integratori utilizzati sono costituiti da reti di integrazione passiva ed a scapito di ciò è possibile utilizzare anche una bobina di Rogowski "autointegrante" inserendo una bassa resistenza come impedenza di terminazione.

La bobina di Rogowski può essere realizzata in due modi e consistono in:

- 1: Una bobina avvolta su un nucleo toroidale rigido utilizzata per misurazioni di alta precisione.
- 2: Bobina avvolta su un nucleo flessibile.

Una tipica rappresentazione della bobina di Rogowski è rappresentata dalla seguente figura:

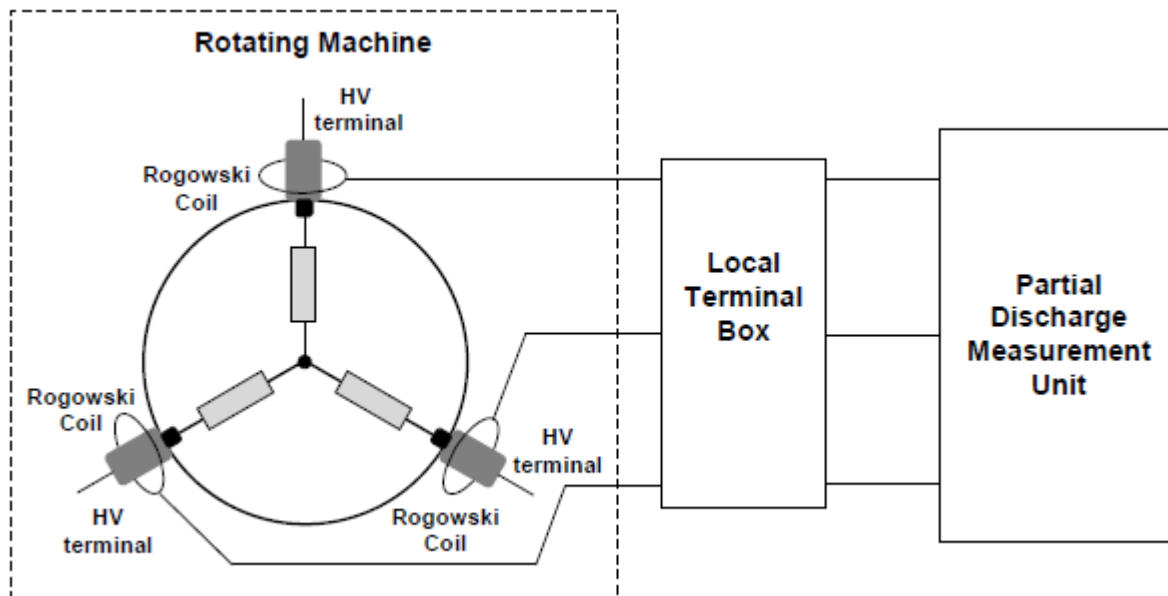


Figura 3.29: Schema di collegamento della bobina di Rogowski in una macchina rotante [Fonte18]

I vantaggi e gli svantaggi che caratterizzano il componente sono riportati di seguito:

VANTAGGI:

- Non necessita di nucleo magnetico e quindi il segnale non è influenzato dagli effetti di saturazione.
- Presenta una bassa induttanza e quindi risponde a variazioni di corrente rapida offrendo una misurazione della larghezza di banda elevata.
- Può diventare aperto e flessibile rendendolo uno strumento non invasivo in quanto può essere avvolto attorno al conduttore in tensione senza disturbarlo.
- Bobina correttamente formata e con avvolgimenti equidistanti lo rende immune alle interferenze elettromagnetiche.
- Ridotte dimensioni rispetto a un trasformatore di corrente.

SVANTAGGI:

- La bobina presenta una sensibilità inferiore rispetto all'accoppiatore capacitivo.
- Diventa suscettibile alle interferenze esterne se non progettato correttamente.

Un ulteriore applicazione di tale strumento è rappresentata dalla seguente figura:



Figura 3.30: Installazione della bobina di Rogowski all'interno di una morsettiera di un motore [Fonte18]

-HIGH FREQUENCY CURRENT TRANSFORMER:

I trasformatori a radiofrequenza HFCT, utilizzati per il monitoraggio on-line delle PD nelle macchine elettriche, sono un esempio di sensore induttivo che rispetto alla bobina di Rogowski fornisce in uscita un segnale di corrente proporzionale alla corrente primaria.

La relazione che correla le rispettive correnti è la seguente:

$$I_s = \frac{N_p}{N_s} * I_p \quad 3.2$$

Dove:

I_s : è la corrente secondaria

I_p : è la corrente primaria

N_p : è il numero di avvolgimenti primari

N_s : è il numero di avvolgimenti secondari

Il segnale ad alta frequenza generato dalle PD attraverso l'avvolgimento di statore giunge ai cavi di alimentazione e viene rilevato dall' HFCT attraverso transistori ad alta frequenza.

Dal punto di vista costruttivo assomiglia alla bobina di Rogowski ma l'HFCT ha un nucleo realizzato in materiale ferromagnetico come la ferrite.

Come soglie di frequenza può operare da 100 kHz fino a 100 MHz.

Il materiale magnetico del nucleo influisce negativamente sulla larghezza di banda operativa.

I materiali magnetici tendono a saturare con densità di flusso elevate quindi tale strumento tende a saturare quando viene utilizzato per macchine ad elevata corrente.

Inoltre la linearità si riduce quando ci si avvicina al punto di saturazione e quindi non risulta adatto per macchine con elevata corrente nominale.

L'HFCT può essere realizzato in due modi:

1: A nucleo solido dove sono disponibili in differenti dimensioni e sensibilità.

2: A nucleo diviso. Sono molto più costosi e sono migliori rispetto a quelli rigidi in quanto possono essere inseriti senza interrompere il circuito.

In passato l'HFCT veniva collegato attorno alla connessione neutro-terra perché in questo modo si ha una soglia di frequenza più basso evitando così il problema della saturazione.

Più recentemente sono stati fatti tentativi di collegamento del HFCT attorno a cavi di collegamento schermati risultando però un'applicazione limitata in quanto si aveva problemi di saturazione della frequenza di alimentazione [Fonte18].

Un' immagine di tale strumento è mostrato di seguito:

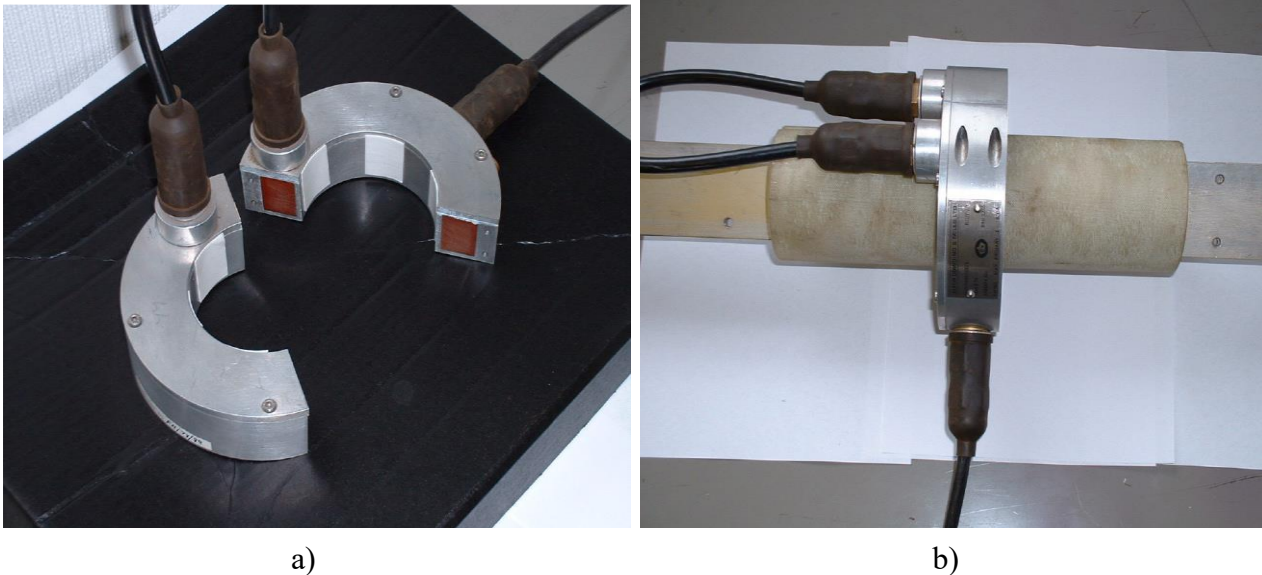


Figura 3.31: a) bobina standard PDC 85, b) PDC 85 installata sulla barra del bus [Fonte18]

3.3.3 MISURE DELLE SCARICHE PARZIALI NEI CAVI:

Per quanto riguarda i metodi di misura e monitoraggio delle scariche parziali nei cavi si eseguono in modalità off-line e modalità on-line.

-MISURAZIONI OFF-LINE:

Nelle misurazioni off-line si utilizza una sorgente di alta tensione, che non deve essere soggetto a scarica parziale, collegato al cavo il quale è scollegato dalle apparecchiature esterne.

Un esempio di tale circuito di misura è il seguente¹⁹:

¹⁹ Fonte: file:///C:/Users/utente/Downloads/FEA.Highbthm.NETA_SP17_FlowONE.pdf

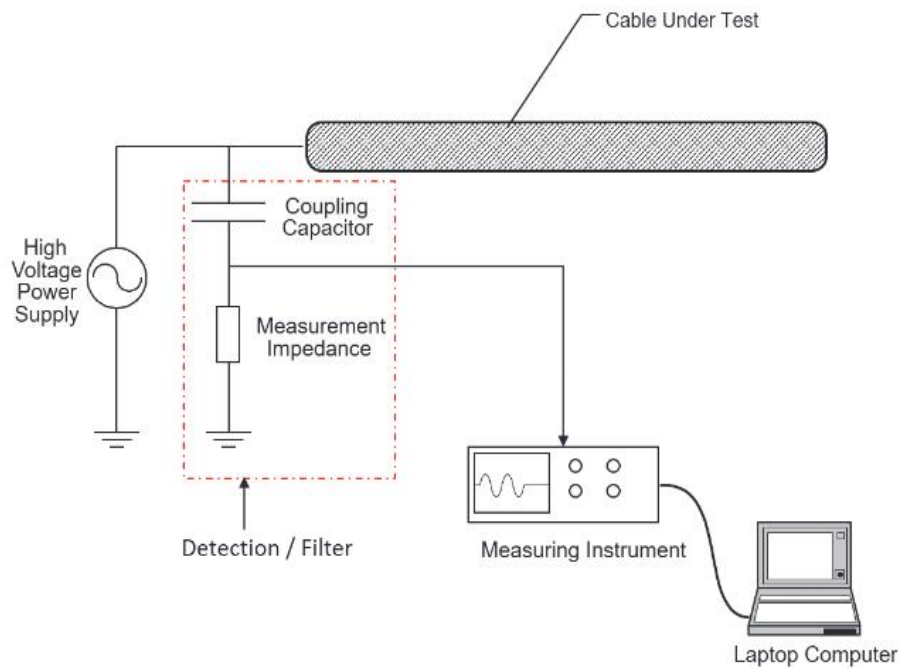


Figura 3.32: Sistema di misura delle PD nei cavi [Fonte19]

Come si osserva dal circuito è presente un generatore di alta tensione che fornisce l'impulso di corrente, un accoppiatore capacitivo che permette di accoppiare i due circuiti di AT e BT, un'impedenza di misurazione che permette di eseguire la misura della PD attraverso la misura della tensione ai suoi capi mediante lo strumento di misura e un computer per eseguire la diagnostica.

-MISURAZIONI ON-LINE:

Nella misurazione on-line non si necessita di sorgente di alta tensione ma si utilizza direttamente l'alimentazione del sistema di riferimento e si realizza il circuito di monitoraggio [Fonte19].

Un esempio di circuito di monitoraggio applicato ai cavi è il seguente:

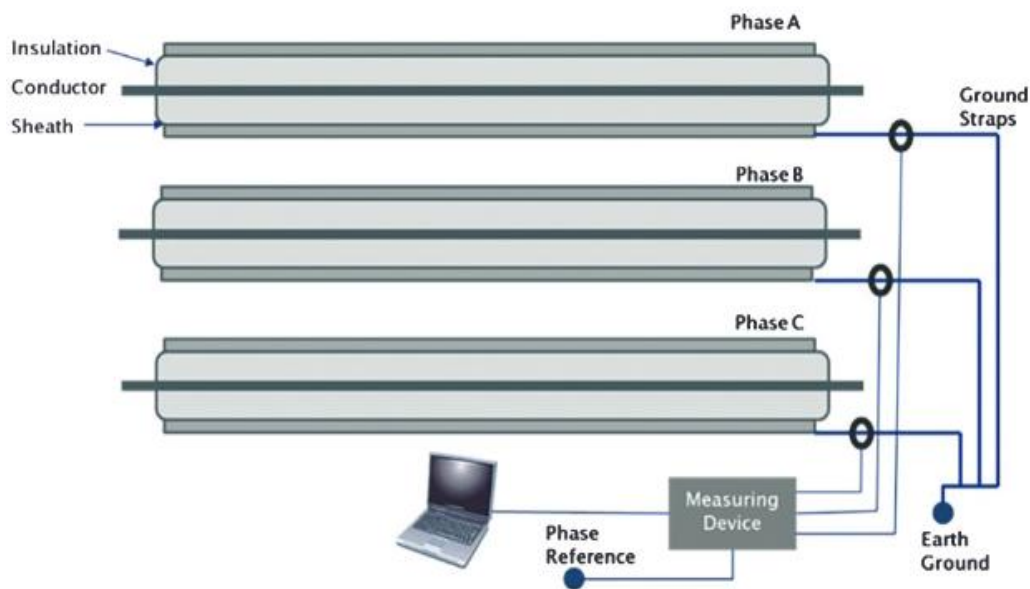


Figura 3.33: [Fonte19]

In questo caso il sistema di monitoraggio è collegato con il riferimento di terra delle guaine delle tre fasi essendo che la scarica parziale si dirige verso il riferimento di terra.

Questa connessione è quella più preferibile essendo che non influisce negativamente sul campo elettrico del conduttore ed inoltre offre più sicurezza.

Come strumento di misurazione si può utilizzare un HFCT il quale viene connesso direttamente con i riferimenti di terra dei conduttori e permette di eseguire la misura diretta della corrente di scarica parziale senza necessità di un calibratore.

La corrente di scarica parziale generata passa attraverso il riferimento di terra, attraverso l'accoppiamento induttivo nel sensore nasce una corrente sul secondario proporzionale alla corrente sul primario per il rapporto spire, mediante il sistema di misura si forniscono le misure al computer.

Questo tipo di misura può essere realizzato per eseguire un monitoraggio continuo oppure periodico a seconda della preferenza [Fonte19].

4 CAPITOLO 4: MERCATO STRUMENTALE

In questo capitolo vorrei soffermarmi sui diversi costruttori di strumenti per la misura ed il monitoraggio delle scariche parziali cercando di presentare gli ambiti di applicazione e fornendo una panoramica sui diversi strumenti offerti dalle aziende con approfondimento riguardante le tecnologie degli strumenti e dei metodi di misura delle PD.

4.1 PRINCIPALI COSTRUTTORI:

OMICRON:

L'azienda Omicron è stata fondata oltre 30 anni fa in Austria e all'inizio si è occupata principalmente di sviluppare test per sistemi di misurazione e protezione.

Successivamente l'Azienda è andata ad ampliarsi diventando Internazionale con 24 uffici in tutto il mondo e clienti in oltre 160 paesi.



Figura 4.1: Fonte²⁰

Gli ambiti di applicazione della Omicron vertono sulle prove e monitoraggio dei cavi, prove sui trasformatori, eseguono test di messa a terra, test sugli interruttori di protezione, test di protezione e monitoraggio delle macchine rotanti e delle linee di trasmissione e test sulle apparecchiature di misura [Fonte19].

Nell'ambito delle misure su scariche parziali tale Azienda esegue misure e monitoraggio sui trasformatori di potenza, sulle macchine rotanti e sui cavi di potenza.

Come esempio di differenti sistemi di misura offerti dalla Omicron sono i sistemi di misura per Trasformatori di Potenza in grado di eseguire i seguenti test [Fonte20]:

- Fattore di perdita
- Analisi delle scariche parziali
- Risposta in frequenza
- Test sul dielettrico
- Monitoraggio delle PD

Per quanto riguarda le macchine rotanti essa si occupa di:

Test sullo statore nello specifico:

- Analisi delle scariche parziali
- Fattore di perdita

²⁰ Fonte: <https://www.omicronenergy.com/en/company/>

- Imperfezione elettromagnetica detta anche misura del flusso vagante

Test sul rotore:

- Resistenza di contatto
- Pole Drop testing
- Rilevamento dei guasti causati da sollecitazioni meccaniche

Inoltre per i cavi essa offre:

- Misura dell'impedenza su cavi di potenza
- Analisi delle scariche parziali
- Misura del fattore di perdita
- Analisi della risposta dielettrica

Nell'ambito delle linee di trasmissione invece permette di eseguire i seguenti test:

- Misura dell'impedenza di linea
- Mutuo accoppiamento

Oltre ad occuparsi di monitoraggio e misura fornisce anche differenti sistemi diagnostici a seconda dell'applicazione in tutto il mondo.



Figura 4.2: Apparecchio MONTESTO 200 per il monitoraggio online delle PD [Fonte20]

TECHIMP
ALTANOVA GROUP

TECHIMP:

La TECHIMP (TECHnologicalIMProvements) è un'Azienda che si occupa di tecnologie innovative diagnostiche utilizzate nell'ambito dell'ingegneria elettrica.

Tale Impresa è nata a Bologna nel 1999 ed è diventata una media impresa con strutture di sviluppo e collaudo mirate nell'innovazione espandendosi in termini di quote di mercato e dimensioni.

I prodotti offerti dalla TECHIMP spaziano dalla diagnostica che coprono le applicazioni online e offline, alla manutenzione basata sulla condizione e monitoraggio remoto.

Il cuore principale di sviluppo tecnologico si basa su una tecnologia innovativa di monitoraggio globale dove vengono integrati il monitoraggio e l'analisi delle scariche parziali con l'analisi del gas disciolto (DGA), monitoraggio delle vibrazioni, valutazione della temperatura e della potenza (DTS) e misurazioni tan-delta utilizzando sistemi di monitoraggio specificatamente sviluppati.

Nel mondo la TECHIMP si trova in Italia, Cina, Brasile, Germania e Stati Uniti e i servizi offerti sono²¹:

- Test di messa in servizio
- Test di accettazione in fabbrica
- Test di collaudo offline
- Test di collaudo offline su VLF
- Test di collaudo online
- Test PD sequenziali
- Service card
- Test PD simultanei
- Formazione

La TECHIMP offre sistemi di misurazione delle PD come il sensore High Frequency Current Transformer, il Transient Earth Voltage, calibratori capacitivi ed anche sistemi di monitoraggio delle PD come AQUILA e PD SCOPE che verranno descritti nel paragrafo successivo.



Figura 4.3: Dispositivo HFCT

HIGHVOLT: **HIGH
VOLT**

La HIGHVOLT è leader mondiale nel settore della misura in alta tensione e nei sistemi di apparecchiature di misurazione.

²¹ Fonte: <http://www.techimp.com/>

La sede principale si trova in Germania più precisamente a Dresda e offre sistemi e dispositivi per testare apparecchiature elettriche utilizzate nel trasferimento di energia elettrica come trasformatori, cavi elettrici e quadri²².

Fornisce strumenti utili per testare diversi tipi di sistemi AC e DC garantendo l'esecuzione di diversi tipi di test come il test della tensione di impulso, test di corrente d'impulso.

Riguardo all'ambito delle misure fornisce sistemi di misurazione che spaziano dai divisori in alta tensione, sistemi di misura di tensione e corrente, registratori digitali HiRES, sistemi di misura della perdita del trasformatore e sistemi di misurazione delle PD.

I dispositivi offerti dalla HIGHVOLT per la misura delle PD si basano su differenti applicazioni che differiscono dal tipo di test come:

- Requisiti di misurazione a canale singolo e multicanale
- In base alle diverse procedure di misurazione (IEC 60270, UHV, acustica)

I dispositivi di misura delle PD possono essere integrati con sistemi di acquisizione dati, di controllo e sistemi di registrazione di prova in modo da migliorare la modalità di operamento [Fonte22].

Le differenti applicazioni di tali sistemi di misura sono:

- Test su componenti, dispositivi e sistemi di apparecchiature in Media Tensione e Alta Tensione
- Test in fabbrica e in loco.
- Prove su materiali di ricerca.

Un esempio di sistema di misura offerto da tale azienda è:



Figura 4.4: Sistema Partial Discharge Detector ICM [Fonte22]

Prysmian
Group

PRYSMIAN:

La Prysmian è un'azienda italiana con sede centrale a Milano leader nel settore della produzione di cavi per applicazioni nel settore dell'energia, delle telecomunicazioni e delle fibre ottiche.

²² Fonte: <https://www.highvolt.de/en/desktopdefault.aspx/tabid-1059/>

La Prysmian nasce nel Luglio del 2005 attraverso l'acquisizione di sistemi di cavi per l'energia e telecomunicazione e diverse attività della Pirelli, nel 2011 nasce la Prysmian Group attraverso l'unione della Draka e la Prysmian.

Successivamente nel 2018 avviene l'unione tra il Prysmian Group e la General Cable²³.

La Prysmian fornisce soluzioni per i collegamenti dei cavi sotterranei e sottomarini ad alta tensione, sono i maggiori produttori di cavi per telecomunicazioni con tecnologia in fibra ottica, ottica e rame.

I mercati su cui verte riguardano le telecomunicazioni, costruzioni e infrastrutture, trasporti e mobilità, industrie, Asset Management ed elettronica e infine Utilities e Power Grids.

La Prysmian offre sistemi per la misura delle scariche parziali come la PRY-CAM, ovvero un dispositivo portatile con la forma di telecamera.

Tale tecnologia oltre a fornire misure delle PD è in grado di misurare grandezze come la temperatura di un cavo, i rumori generati intorno ai cavi e molto altro.

Le prospettive future della Prysmian vertono sullo sviluppo di nuovi sistemi di misura per le applicazioni in DC e di nuovi sistemi di integrazione costituiti da sistemi di monitoraggio e sistemi via cavo [Fonte23].

4.2 OFFERTE STRUMENTALI

In questo paragrafo presenterò le diverse offerte strumentali che i vari costruttori, di cui ho parlato prima, utilizzano per le misure ed il monitoraggio delle PD sui sistemi elettrici per la trasmissione di energia elettrica.

OMICRON

MISURE

- **MPD 800:**

²³ Fonte: <https://www.prysmiangroup.com/en/company/prysmian-group-history>



Figura 4.5: Dispositivo MPD 800²⁴

Il sistema di misurazione MPD 800 rappresenta un sistema universale per la misura delle PD offerto dalla OMICRON con ambiti di applicazione nei sistemi elettrici come trasformatori, macchine rotanti e cavi di potenza.

Tale sistema offre funzionalità software e hardware migliorate rispetto ad altri sistemi di misura come l'MPD 600.

Lo strumento MPD 800 permette di eseguire le misure sugli avvolgimenti di statore secondo le norme IEC e di avere i seguenti vantaggi [Fonte20]:

- 1: Isolamento galvanico tramite cavi in fibra ottica
- 2: PD multicanale sincrono
- 3: Registrazione e riproduzione dei set di dati
- 4: Soppressione del rumore
- 5: Software personalizzabile

E' in grado di rilevare e localizzare in maniera accurata i difetti di isolamento e permette di valutare il rischio di guasti alle apparecchiature [Fonte20].

Può essere utilizzato sia per test in fabbrica che in loco e grazie ad un potente sistema di filtraggio è in grado di separare anche i più piccoli impulsi di PD dalle interferenze esterne.

E' utilizzato in una vasta gamma di applicazioni come test per settore nell'alimentazione, officine di riparazione, laboratori, test diagnostici per motori nel settore industriale.

I campi di investigazione vertono su:

- >> Trasformatori di potenza
- >> Cavi di alimentazione
- >> Macchine rotanti

²⁴Fonte: <https://www.omicronenergy.com/download/document/F4F60231-0101-4DF1-918D-9DF5DEE3D035/>

- >> Quadri isolati in gas (GIS) e quadri in media tensione
- >> Azionamenti industriali
- >> Trasporto ferroviario
- >> Componenti per l'alta tensione come i passanti dei trasformatori, isolatori, condensatori, terminazione cavi.

Ha una larghezza di banda di 35 MHz ed una frequenza di campionamento di 125 MS/s [Fonte24].

Consente di eseguire la soppressione del rumore in ambienti industriali attraverso l'implementazione degli algoritmi 3PARD e 3FREQ.

-COMPOSIZIONE:

Il sistema MPD 800 è composto da un dispositivo di misurazione MPD 800, da una batteria RBP1, dall'unità di controllo MCU2 e dal software MPD suite.

I dispositivi MPD 800 e le batterie RBP1 vengono collegati direttamente all'oggetto di test tramite dispositivi di accoppiamento CPL1 o CPL2 mentre il sistema MCU2 è connesso tramite USB ad un laptop o PC insieme al software installato.

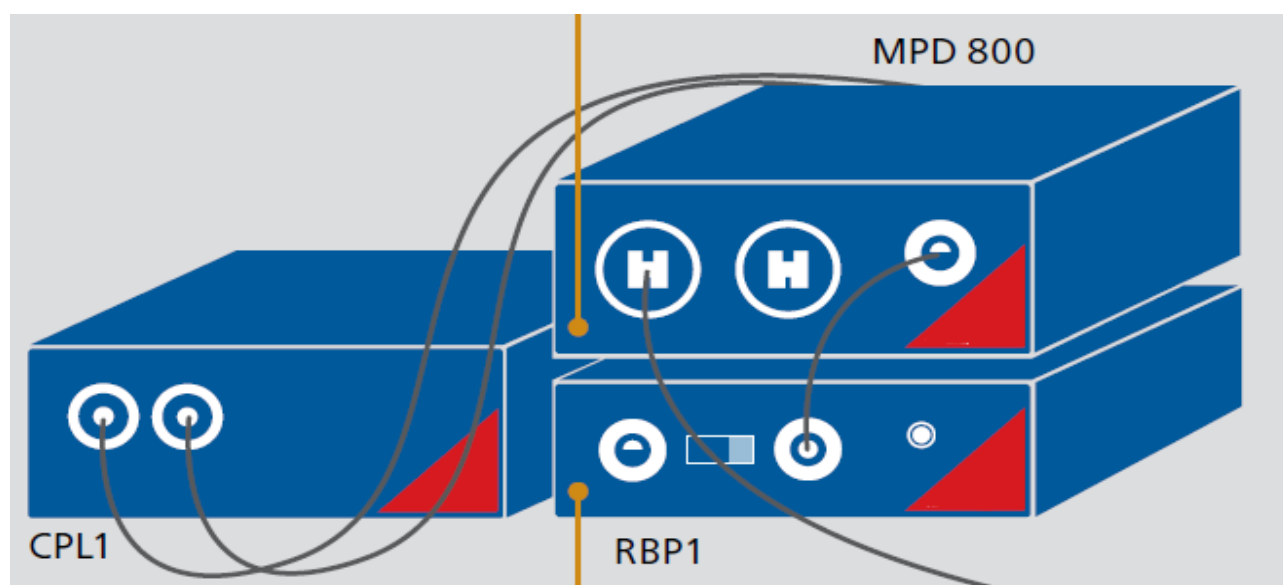


Figura 4.6: Sistema connesso ad un dispositivo di accoppiamento CPL1 e RPB1 [Fonte24]

Presenta due canali di ingresso in fibra ottica facili da collegare e può essere facilmente ampliato collegando più unità.



Figura 4.7: Gli ingressi in fibra ottica sono rappresentati da FO 1 ed FO 2 [Fonte24]

Attraverso misurazioni sincrone il MPD 800 consente di eseguire operazioni con un massimo di 18 unità di misura [Fonte19].

Un esempio di collegamento dei sistemi menzionati è rappresentato dalla seguente figura:



Figura 4.8: [Fonte24]

-COME PREPARARE IL DISPOSITIVO PER LE MISURE:

Il dispositivo MPD 800 offre differenti pacchetti software che possono essere essenziali o universali oppure pacchetti software specifici per una particolare applicazione.

I diversi moduli offrono proprietà specifiche, l'interfaccia .COM ad esempio è basata sul web per permettere una facile automazione o per eseguire misure delle PD in DC.

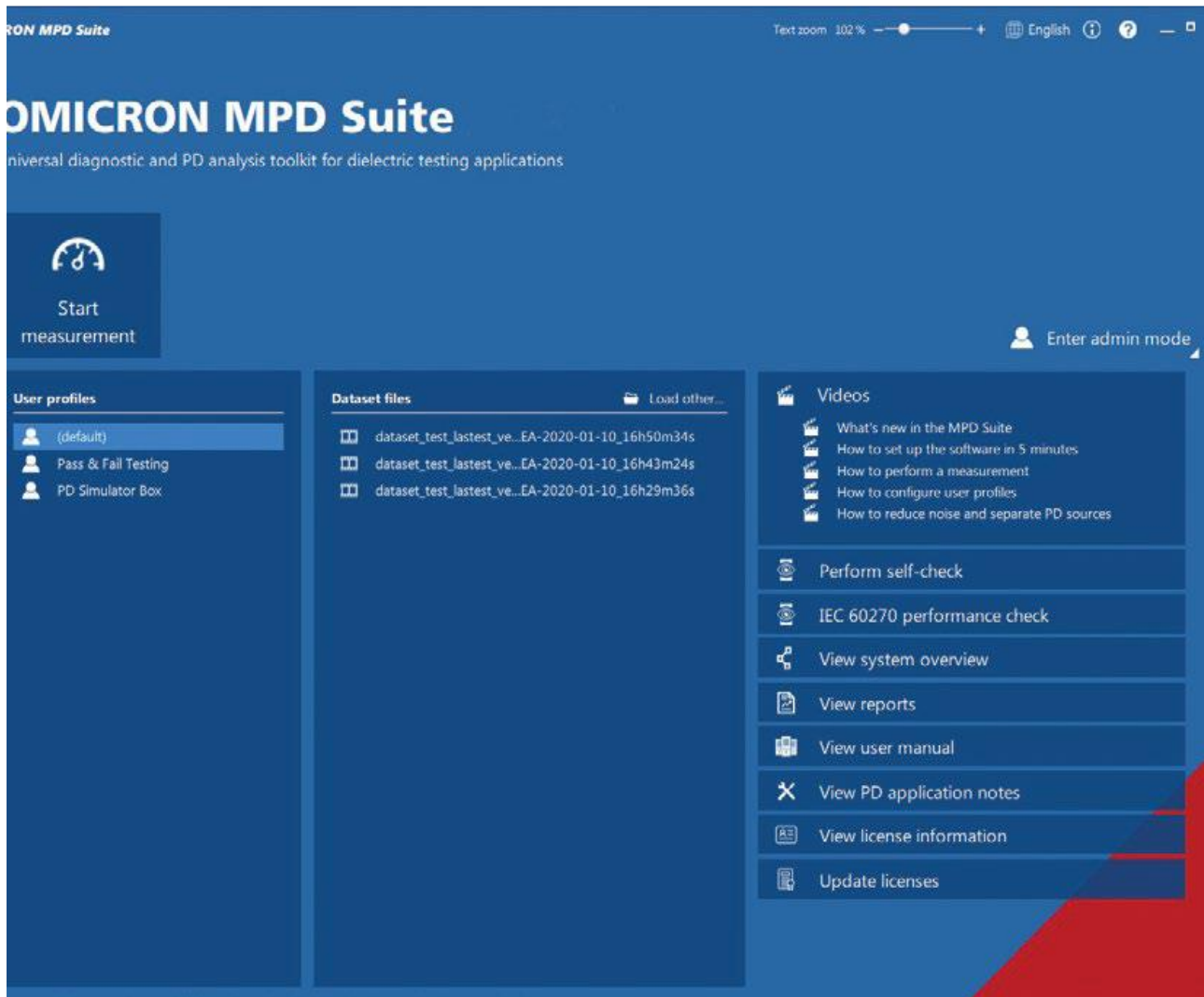


Figura 4.9: Interfaccia del software offerto dal sistema MPD [Fonte24]

Il sistema MPD può essere personalizzato permettendo di impostare parametri come l'intervallo di frequenza, filtri, livelli di valutazione oppure nascondere singoli componenti software come schede, diagrammi, pulsanti.

Nei test per l'analisi delle PD nelle macchine rotanti o cavi possono essere nascosti alcune funzionalità del programma in quanto non necessarie.

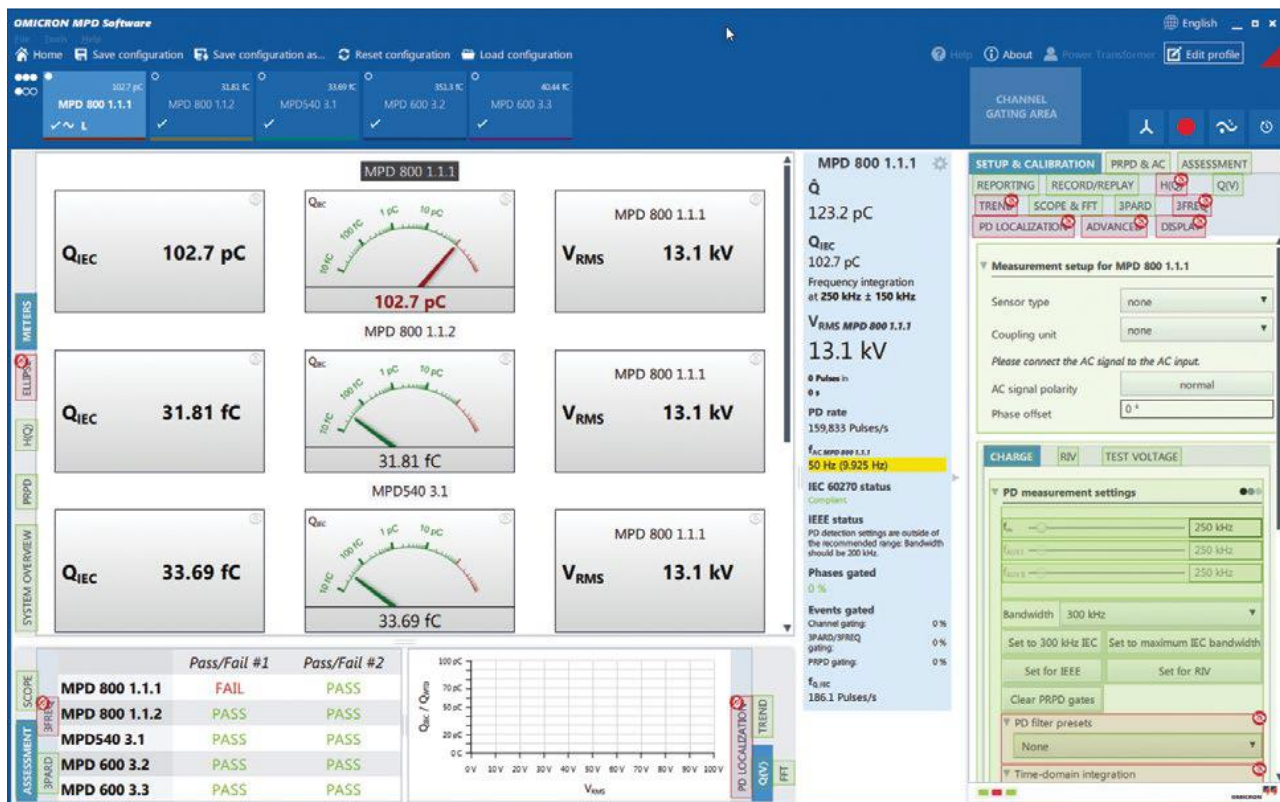


Figura 4.10: [Fonte24]

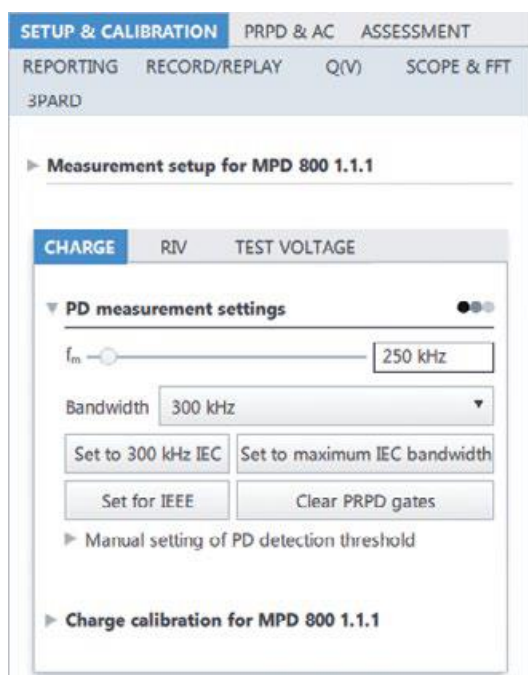


Figura 4.11: Impostazioni offerte dal programma [Fonte24]

-COME IMPOSTARE IL PROGRAMMA ED ESEGUIRE LE MISURE DI PD:

Per le misure vengono utilizzati insieme più dispositivi MPD 800 per misurazioni multicanale o test nei trasformatori, generatori o cavi.

Con la funzionalità “panoramica del sistema” è possibile avere un’idea complessiva della configurazione di misura scelta e permette di visualizzare tutte le unità MPD 800 collegate insieme e mostra i valori e le impostazioni di misura di ciascun canale.

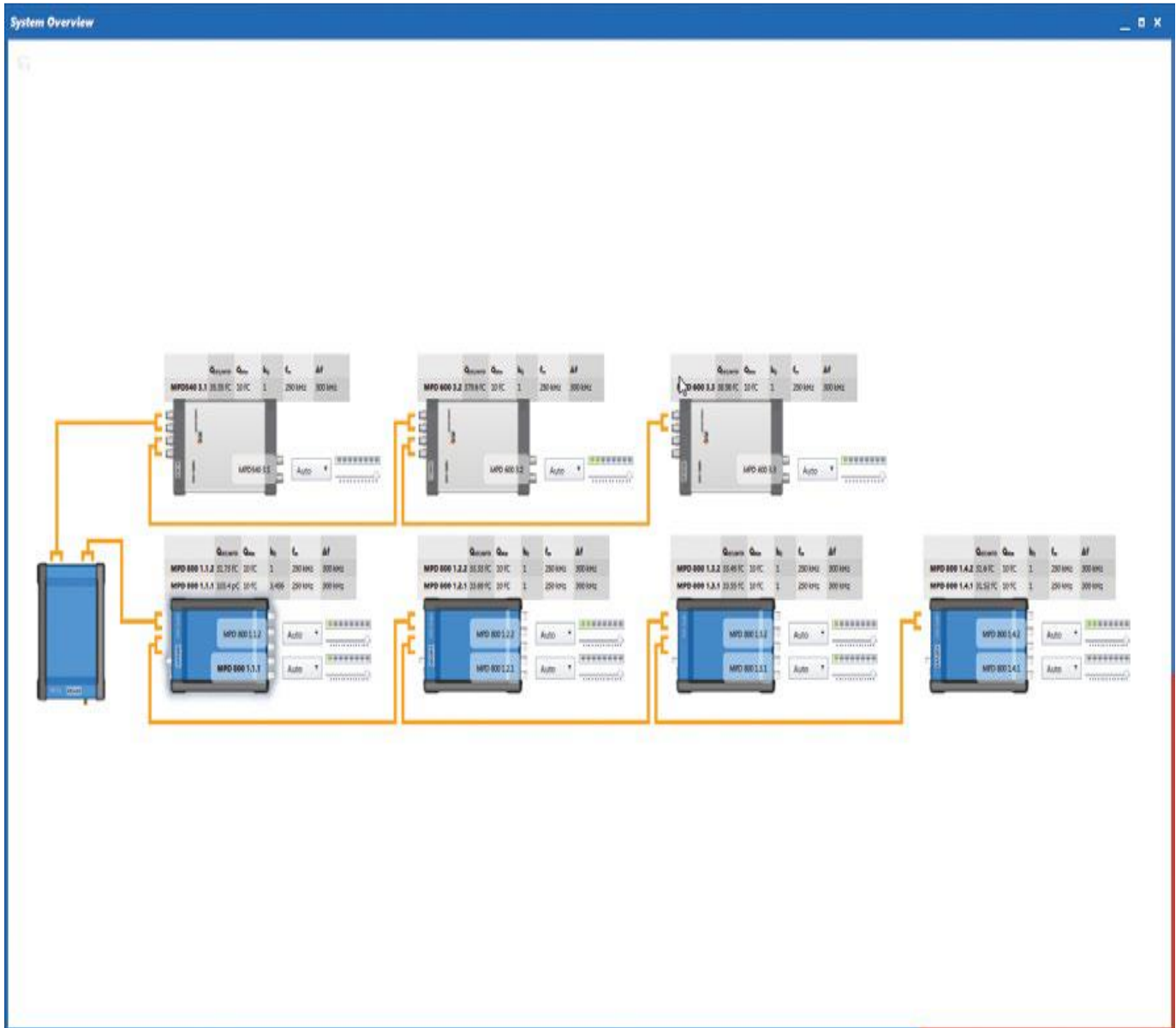
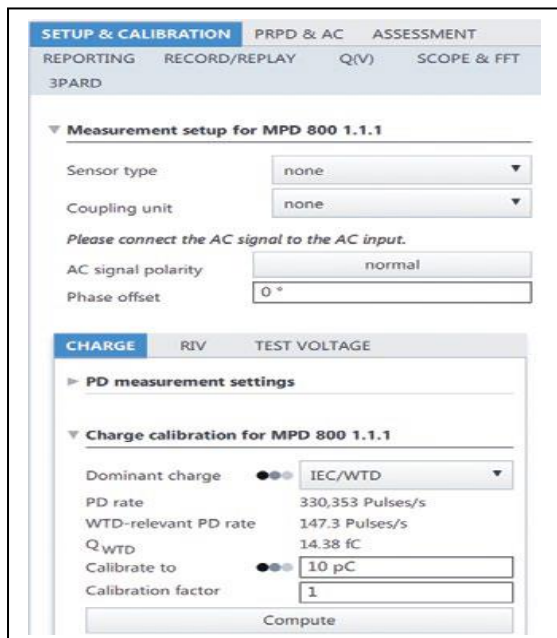


Figura 4.12: Sistema MPD centrale con i vari MPD 800 collegati simultaneamente [Fonte24].

L'MPD consente di selezionare le singole impostazioni di misura adattando la frequenza centrale e scegliendo tra le varie larghezze di banda, permette di escludere componenti di rumori in modo da eseguire la misura reale della PD.



Con il sistema MPD 800 è possibile impostare la carica apparente secondo IEC o RIV (Radio Interference Voltage), oltre a questo può calibrare la tensione di prova garantendo una comparabilità dei risultati ottenuti.

Figura 4.13: Settaggio per eseguire le misure delle PD [Fonte24].

-COME SOPPRIMERE IL RUMORE E SEPARARE LE FONTI DI SCARICA PARZIALE:

Un evento di scarica parziale presente su una fase può coinvolgere anche le altre fasi vicine.

Un modo per permettere di rilevare la PD anche nelle altre fasi vicine si basa sull'utilizzo di due algoritmi come il 3PARD (3-phase amplitude relation diagram) ed il 3FREQ (3-center frequencies relation diagram).

>>Lo strumento **3PARD** permette di differenziare le varie fonti di scarica parziale dalle interferenze esterne.

Il principio di funzionamento si basa sulla misurazione trifase sincrona di un oggetto di test.

I risultati ottenuti vengono rappresentati in un diagramma a stella che facilita il confronto dei risultati e la selezione del modello di scarica [Fonte24].

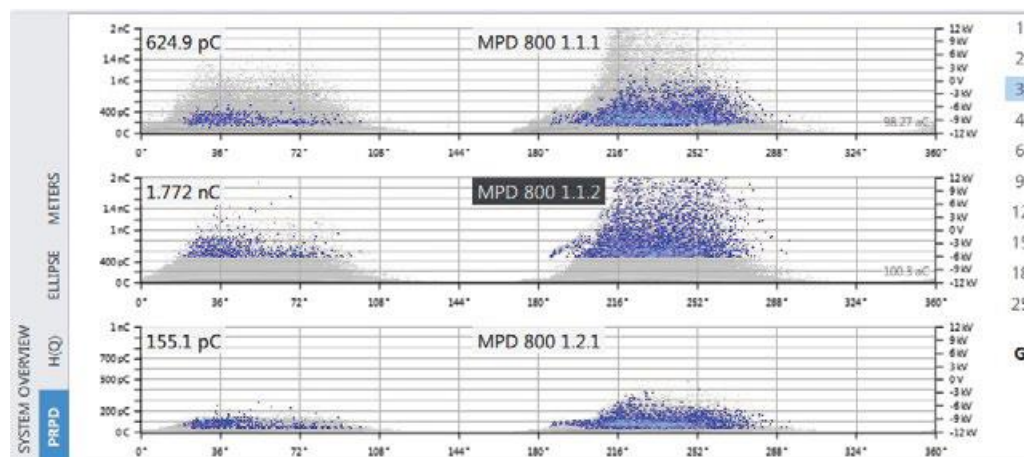
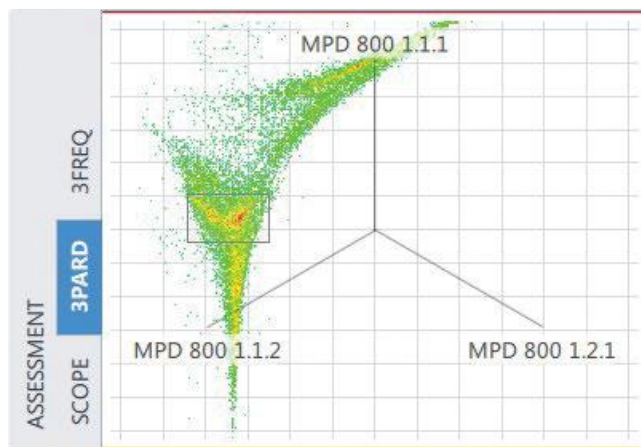


Figura 4.14: Algoritmo 3PARD con la visualizzazione PRPD [Fonte24]



Il filtro analizzatore 3PARD viene inserito su tutte e tre le fasi quindi si necessita di tre canali e due MPD800 se voglio coprire tutte e tre le fasi.

Figura 4.15: Analisi delle PD con l'algoritmo 3PARD [Fonte24]

>>Lo strumento **3FREQ** è un filtro a singolo canale che utilizza tre frequenze di filtro digitali.

E' possibile differenziare le varie PD come la scarica superficiale, corona, interna attraverso il diagramma 3FREQ.

Permettendo di utilizzare un singolo canale può essere usato un singolo MPD 800.

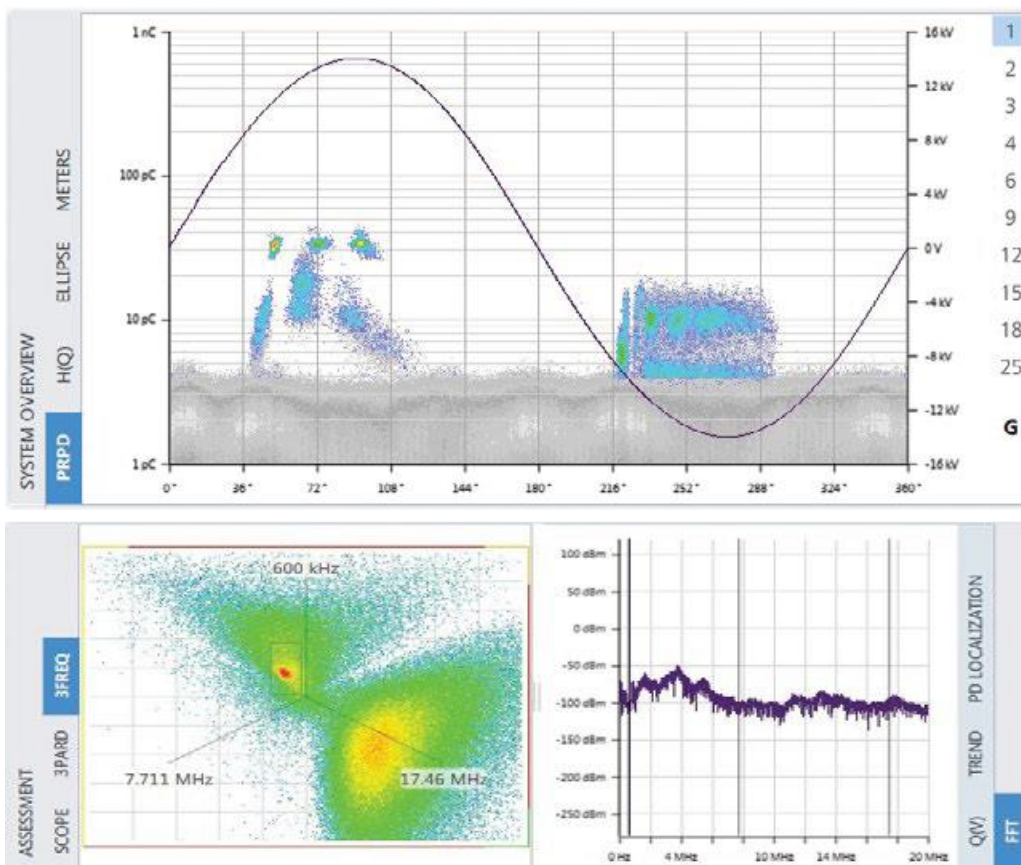
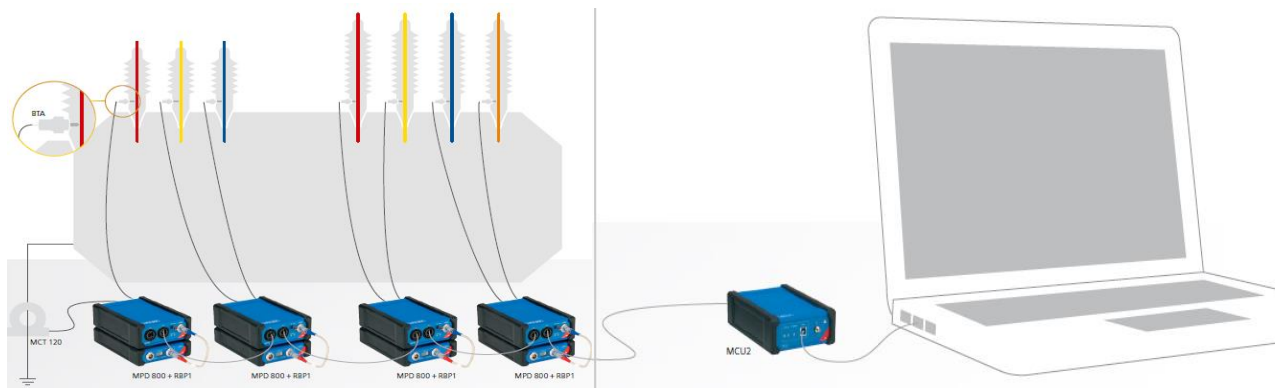


Figura 4.16: Grafico dei risultati ottenuti con il filtro 3FREQ [Fonte24]

SCHEMI DI COLLEGAMENTO DEL SISTEMA:

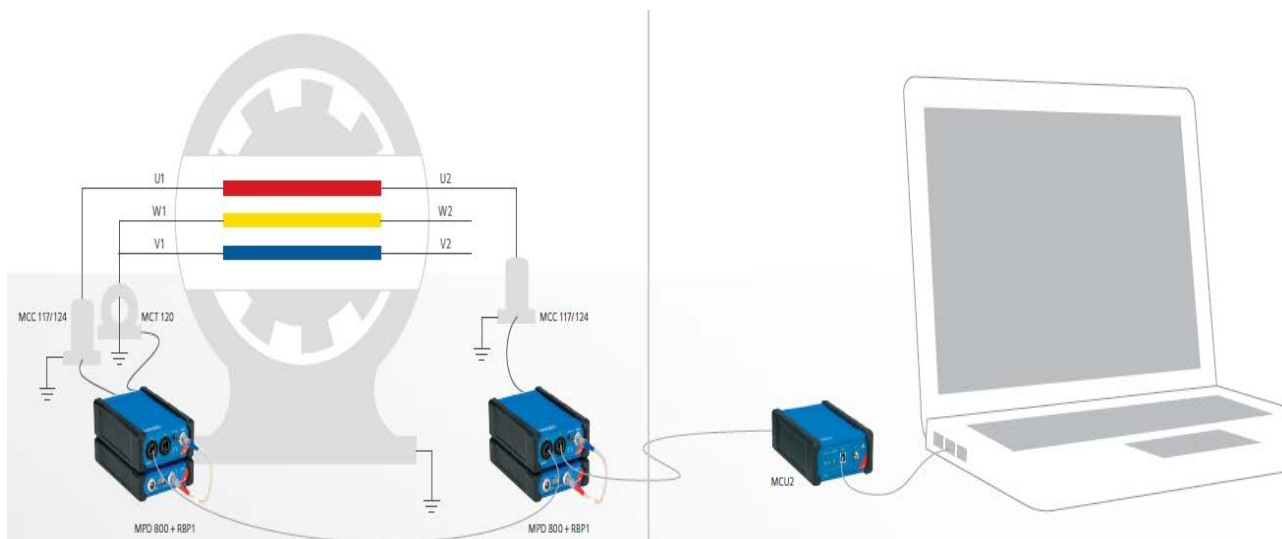
- TRASFORMATORI DI POTENZA:



Come si può vedere dallo schema di collegamento, si connette il sistema di misura con gli isolatori passanti del trasformatore mediante una capacità di accoppiamento, la carcassa del trasformatore è invece connesso ad un HFCT per risentire della possibile presenza di scariche parziale all'interno del trasformatore. Il valore della scarica viene misurato in microvolt o in pC.

Le misure vengono realizzate durante l'accettazione in fabbrica, la messa in servizio in loco e nei test di routine per poter rilevare la presenza di difetti nell'isolamento e prevedere possibili guasti [Fonte24]

- MACCHINE ROTANTI:



Nel circuito di collegamento sono presenti due condensatori di accoppiamento MCC 117/124 collegati alle fasi U1 e U2 e un High Frequency Current Transformer per controllare la possibile presenza di scariche parziali nelle fasi W1 e V1.

Nelle macchine rotanti la misura può essere eseguita sia in modalità off-line con la macchina spenta e soggetta ad una fonte di tensione in alta tensione oppure in modalità on-line quando la macchina è in servizio.

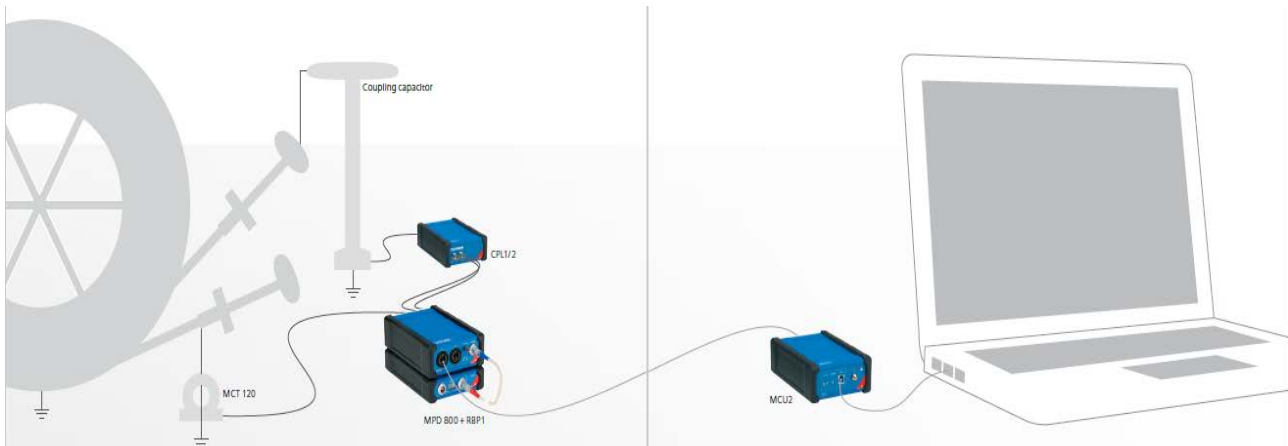
A seconda che il centro stella sia accessibile è possibile eseguire una misurazione monofase.

La misurazione trifase combinata con le tecniche di separazione della sorgente permette di identificare l'attività di scarica parziale in una fase specifica.

Le misurazioni off-line vengono eseguite durante l'accettazione in fabbrica, la messa in servizio in loco e nei test di manutenzione ordinaria.

Le misure di PD possono essere eseguite anche su generatori di grandi dimensioni durante il servizio tramite condensatori di accoppiamento connessi alla macchina [Fonte24].

- CAVI DI POTENZA:



Il cavo viene collegato ad un accoppiatore capacitivo e un HFCT, successivamente attraverso l'accoppiatore CLP1/2 lo si collega con il sistema di misura.

La misura delle PD eseguita nei cavi di media e alta tensione permette di rilevare difetti di isolamento correlati alla produzione.

Nei test in fabbrica, la tensione di prova viene aumentata secondo lo standard internazionale pertinente mentre i segnali di PD passano all'interno del percorso del condensatore di accoppiamento che poi successivamente vengono forniti al nostro sistema di misura.

La tensione viene innalzata superando la normale tensione del cavo di e viene eseguita la misurazione delle PD.

Il test ha come obiettivo prevedere lo stato di isolamento del cavo e la totale assenza di scariche parziali prima che venga messo in servizio.

Inoltre è possibile eseguire misurazioni on-line nei cavi per valutare le condizioni dielettriche del cavo durante l'invecchiamento [Fonte24].

Di seguito sono presentati i dati caratteristici di un MPD 800:

MPD 800

Input

Voltage	PD Input: 80 V _{peak}
Current	AC Input (max. RMS continuous): 250 mA AC Input (min. RMS): 20 nA
Impedance	PD Input: 50 Ω ± 20 % AC Input (f < 4 kHz): 5 Ω ± 20 %
Ports	PD Input: 2 × BNC AC Input: 2 × BNC
Dynamic range	PD Input: 140 dB (overall), 70 dB (per range) AC Input: 170 dB (overall), 107 dB (per range)
Levels	PD Input: 14 AC Input: 5

Frequency range

PD Input Internal quadripole	Enabled: 6 kHz ... 35 MHz Disabled: 0 Hz ... 35 MHz
AC Input	DC, 0.1 Hz ... 10 kHz

Accuracy

PD Input	± 2 %
AC Input	0.02 %
Frequency	± 1 ppm

PC requirements

Hardware ³	Minimum ¹ : Quad-Core 64-bit Intel or AMD CPU with at least 1.6 GHz, 4 GB RAM (e.g. Intel i5, AMD Ryzen 3) Recommended ² : Quad-Core 64-bit Intel or AMD CPU with at least 2.5 GHz, 8 ... 16 GB RAM, dedicated GPU (e.g. Intel i7, AMD Ryzen 5) High-End ³ : Octa-Core 64-bit Intel or AMD CPU with at least 3.2 GHz, 32 GB RAM, dedicated GPU (e.g. Intel i7/i9, AMD Ryzen 7)
Software	Windows 8™, Windows 8.1™, Windows 10™ (all 64-bit)

¹ For example, for 1 × MPD 800 for "pass/fail" testing

² For example, for 1 to 4 × MPD 800 including 3PAR, PD fault localization, channel gating

³ For example, for multi-units up to 18 measurement channels

⁴ Time domain Integration

Output

Optical trigger port	1 × ST (820 nm), OM2, FO cable length ≤ 50 m
OUT port	1 × BNC, 50 Ω ± 10 %, 5 V ± 0.5 %
AUX port	For MBB1 support

Fiber-optic ports

Wavelength	1 308 nm
Connector type (FO1, FO2)	2 × LC (Interchangeable)

PD data processing

Time domain	50 ns ... 8 μs
PD sampling rate	125 MS/s
Resolution	PD: 14 bits AC: 24 bits
PD pulse rate	Max.: 2 Mio./s
PD filters/bandwidths	RIV: 4.5 kHz and 9 kHz Charge: 30 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz, 600 kHz, 900 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 20 MHz
PD input low-pass filters	1.1 MHz, 2.3 MHz, 4.7 MHz
PRPD pre-recording time	0s ... 30 s
PD scope	Recording depth: 131 μs Refresh rate: 41 ms
PD event time resolution	< 2 ns
System noise	Typical ⁴ : < 0.010 pC
Spectrum analyzer noise (100 kHz ... 5 MHz)	< 140 dBm
Max. double pulse resolution (BW = 20 MHz)	< 100 ns
Negative superposition error	< 3 %

Mechanical data and ambient conditions

Humidity	5 % ... 95 %, non-condensing
Operation temperature	-20 °C ... 55 °C / -4 °F ... 89 °F
Dimensions (W × H × D)	119 × 190 × 55 mm / 4.7 × 7.5 × 2.2 in
Weight	870 g / 1.9 lbs

Figura 4.17: [Fonte24]

MONITORAGGIO

- **MONCABLO:**

Moncablo è un sistema di monitoraggio on-line utilizzato per la valutazione continua delle condizioni di isolamento dei cavi, terminazioni e giunti ad alta tensione grazie ad una combinazione di tecnologie software e hardware.

Viene anche utilizzato per eseguire misurazioni simultanee su componenti del cavo durante il test di tensione in AC.

L'interfaccia software fornita da MONCABLO permette di installare in via remoto il sistema di monitoraggio, visualizzare i dati di PD in tempo reale e analizzare i dati raccolti ²⁵.



Figura 4.18: [Fonte25]

La tecnologia utilizzata dalla OMICRON per separare le fonti di PD l'una dalle altre si basa sulle tecniche multicanale sincrone come il diagramma di relazione di ampiezza trifase 3PARD.

>>COMPONENTISTICA:

²⁵ Fonte : <https://www.omicronenergy.com/download/document/60A31CB9-AE62-47D1-BD5A-B2E0443FA6EB/>

1)TRASFORMATORE DI CORRENTE AD ALTA FREQUENZA MCT 120:



[Fonte25]

- >> Viene inserito su terminazioni e giunti dei cavi
- >> Configurazione a nucleo diviso per rendere più semplice l'installazione sui giunti dei cavi
- >> Garantisce misurazioni sensibili anche in presenza di correnti elevate sulle guaine e sui collegamenti di terra.

2)UNITA' DI ACQUISIZIONE E PROTEZIONE INVOLUCRO OMS 841:



[Fonte25]

- >> La protezione IP65 protegge dalla presenza di polvere, umidità e possibili accessi non autorizzati
- >> 4 canali sincroni
- >> Filtro passa-banda interamente digitale

3)ALIMENTATORE INDUTTIVO IPS 820:



[Fonte25]

- >> Viene installato su una fase del cavo
- >> Offre una tensione di uscita stabile per l'alimentazione del sistema di monitoraggio

4)CONNESSIONI IN FIBRA OTTICA:

- >> Consente la trasmissione su lunga distanza
- >> I dati sulle PD vengono sincronizzati
- >> Grazie all'isolamento galvanico garantisce sicurezza all'operatore



5) MASTER CONTROL UNIT M.C.U:

[Fonte25]

- >> Converte un segnale ottico in un segnale elettrico e lo trasferisce al computer tramite connessione USB
- >> Può essere usato sia in modalità mono-modale o multi-modale con le fibre ottiche



6) COMPUTER CENTRALE CON SOFTWARE PER IL MONITORAGGIO:

[Fonte25]

- >> Il sistema di database permette l'archiviazione e il recupero dei dati a lungo termine
- >> I dati vengono visualizzati sul WEB
- >> Può essere integrato con altri sensori

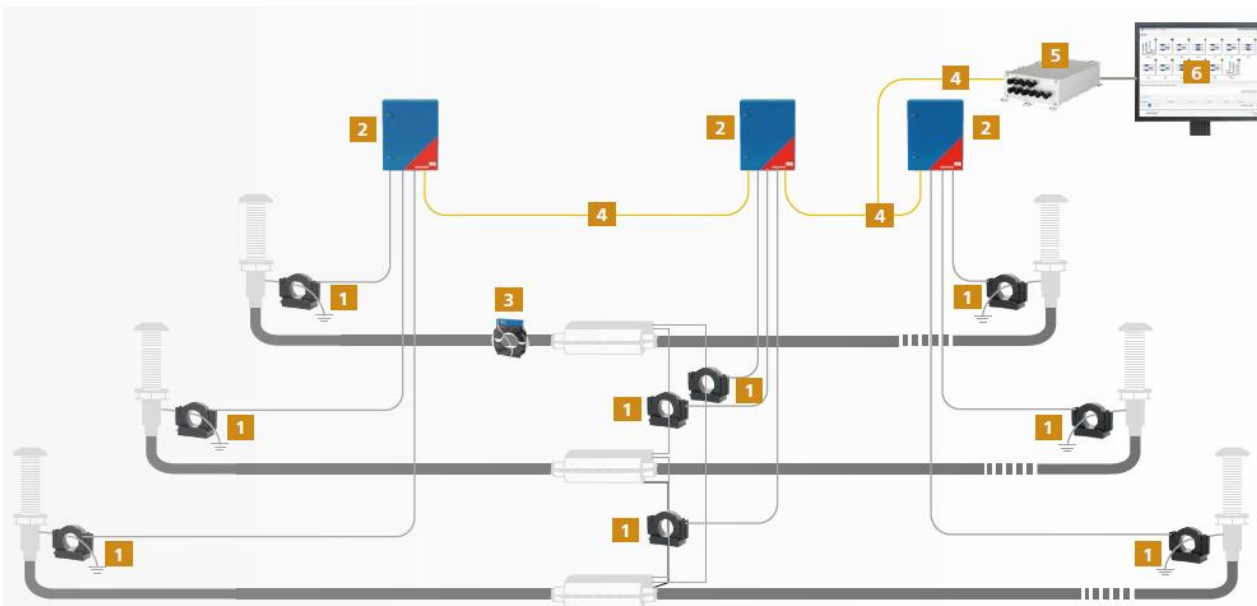


Figura 4.19: Esempio di connessione dei componenti [Fonte25]

>>ANALISI SOFTWARE PER LE MISURE DELLE PD:

Per eseguire l'analisi con il software si prende come riferimento il sistema di analisi ovviamente e si tracciano delle figure e grafici che permettano di avere informazioni sul sistema.

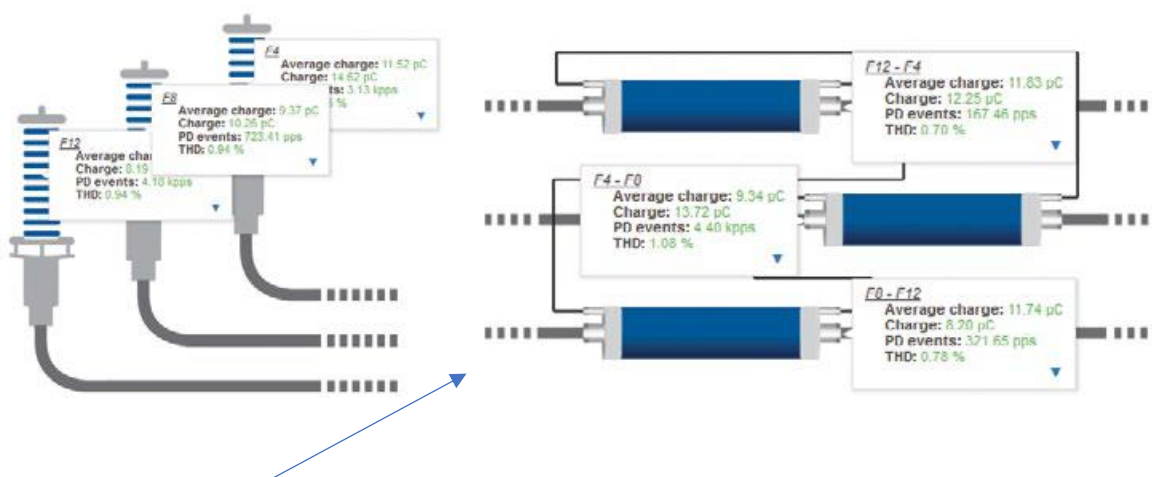
Consideriamo infatti la seguente figura:



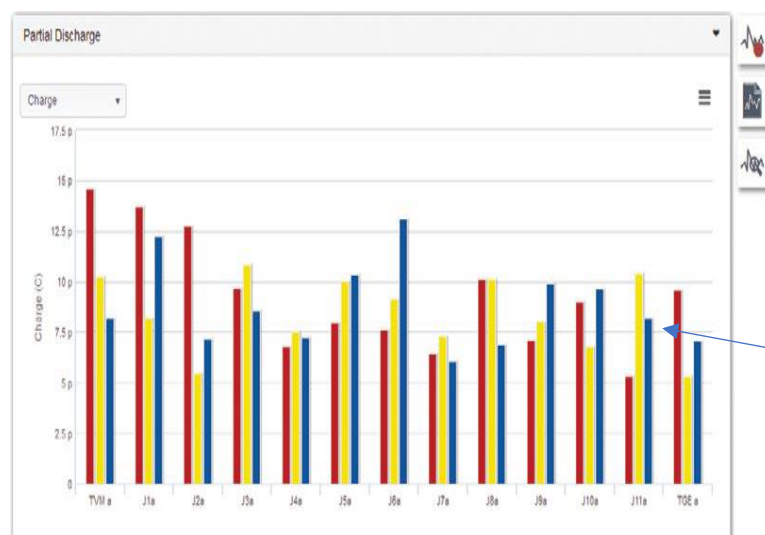
Si hanno 2 terminazioni e 11 giunti di un cavo.

In questo caso si forniscono le condizioni in tempo reale di tutti gli accessori dei cavi monitorati.

L'event Log o registro eventi gestisce gli avvisi e gli allarmi per il sistema in analisi.



Nei grafici sopra si forniscono le misure in tempo reale degli oggetti in analisi.

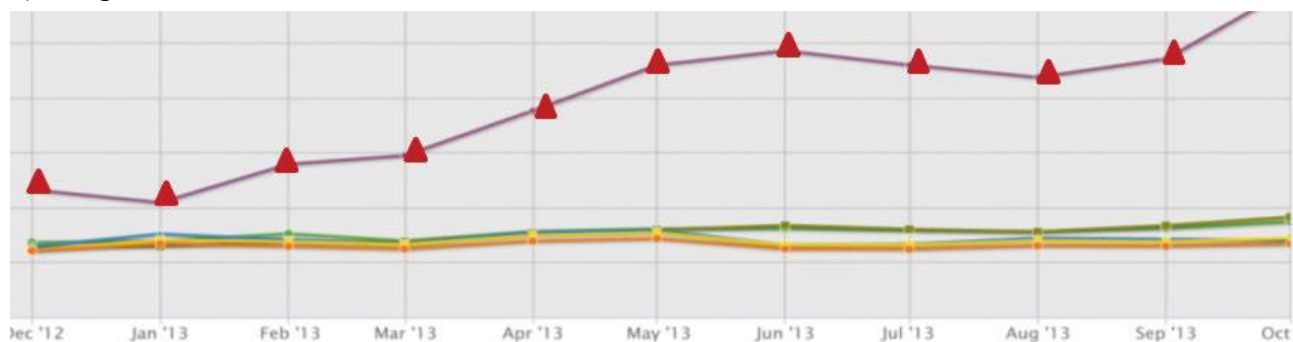


In questo grafico si hanno i valori delle scariche parziali per ogni componente monitorato.

Una volta ottenute le informazioni sui dati si esegue:

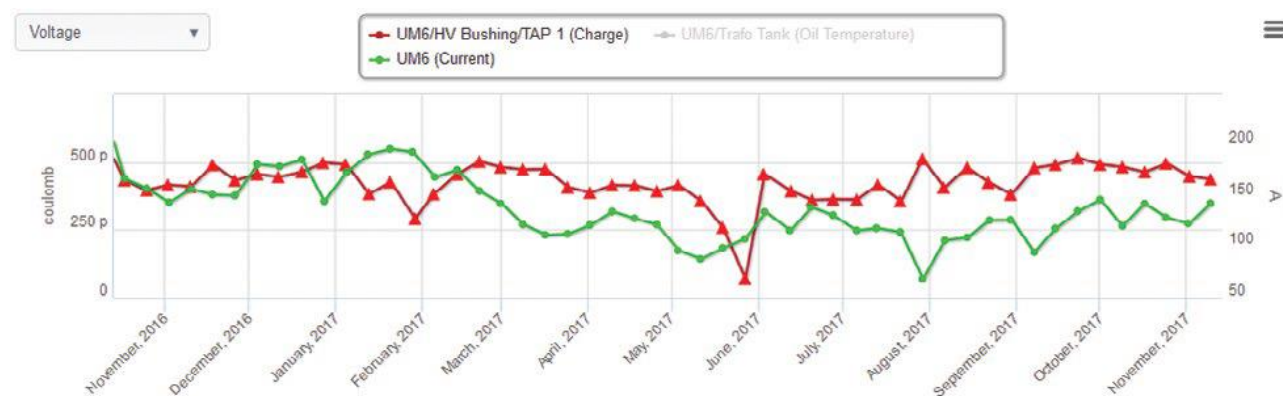
a) Registrazione: Viene eseguito per permettere un'analisi dettagliata e possono essere registrati periodicamente.

b) Vengono visualizzate le tendenze storiche:



[Fonte25]

c) Analisi dei dati:



[Fonte25]

La diagnosi completa del cavo viene eseguita nel seguente modo:

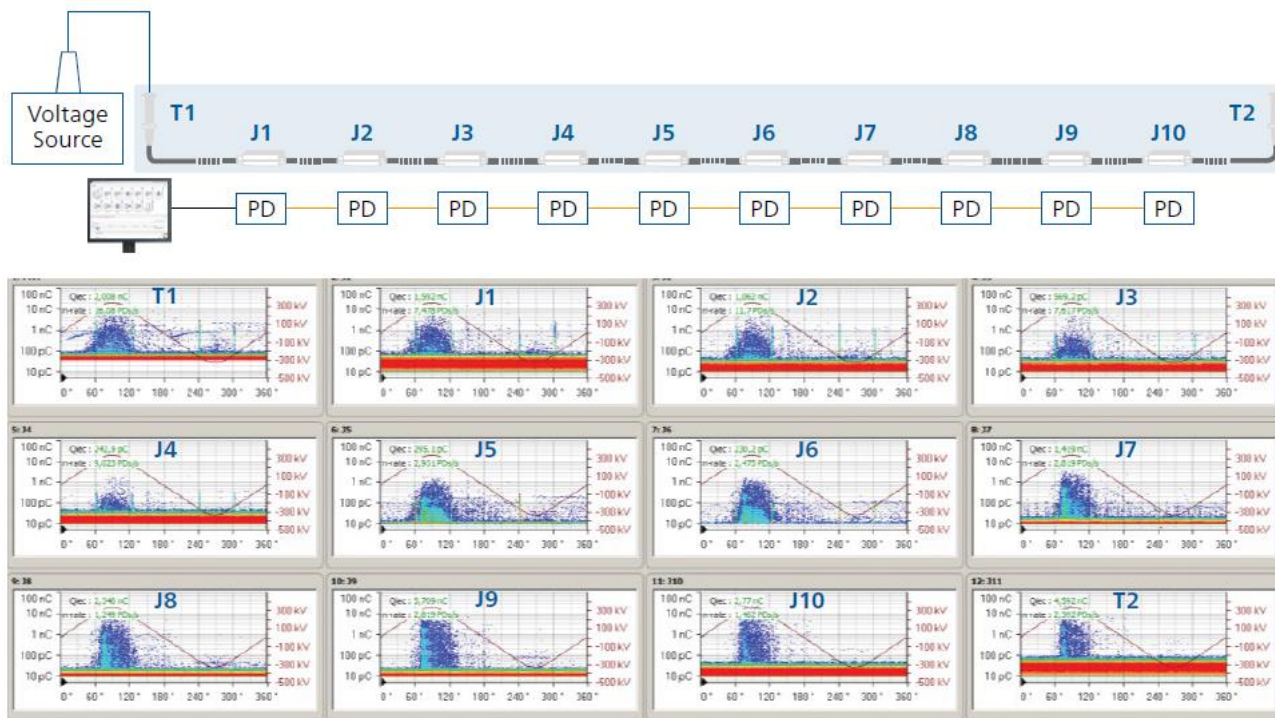


Figura 4.20: [Fonte25]

- Misurazione simultanea delle PD su ogni componente
- Sincronizzazione con la sorgente di tensione di prova
- In simultanea con la prova di messa in servizio è possibile eseguire la registrazione completa delle attività di PD [Fonte25].

Benefici:

- > Sistema di monitoraggio reso disponibile in un unico sistema
- > Acquisizione sincrona
- > Sistema di localizzazione dei difetti avanzato
- > Gestione sistema basato sul web
- > Notifica e-mail per possibili allarmi
- > Integrazione con altri sistemi di monitoraggio

Di seguito un esempio di specifiche tecniche del componente:

MCT 120 High-frequency current transformer		OMS 841 Protective enclosure		MCU Master control unit		Software requirements	
Frequency Range (-6 dB)	80 kHz ... 40 MHz	Dimensions (W x H x D)	400 x 500 x 210 mm / 15.7 x 19.7 x 8.3 in.	Data output	USB 2.0	OMS System & Monitoring Software	
Inner hole dimensions	ø = 53.5 mm / 2.11 in	Weight	~15 kg / 33 lb.	Power supply	via USB 2.0	The minimum system requirements for running the OMS System Software and the Monitoring Software are:	
Outer dimensions	114 x 154 x 62 mm / 4.49 x 6.07 x 2.45 in	OMS 841 External power supply		Environmental specifications		➢ Windows 7 (64bit), Windows 8 (64bit) or Windows Server 2012 (64bit)	
Ferrite core	Split	AC	DC	Operating temperature	-30 ... +55 °C / -22 ... +131 °F	➢ Processor: Intel i5 2.4 GHz or a comparable x64 processor	
Connector	BNC, 50 Ohm, female	110 V AC ... 240 V AC / 50/60 Hz	110 V DC ... 300 V DC	Storage temperature	-40 ... +80 °C / -40 ... +176 °F	➢ RAM: 4GB	
Weight	1.2 kg / 2.65 lb	IPS 820 Inductive power supply		Humidity	Up to 95 % r.H. (non-condensing)	➢ USB 2.0 high speed port	
Operating temperature	-30 °C...100 °C / -22 °F...212 °F	Current range	> 100 A	Vibration, shock and protection class		➢ Screen resolution (minimum): 1024 x 768 pixels	
OMS 841 Acquisition unit		Frequency	45 Hz...65 Hz	Standard Rating		A central computer that meets these software requirements is provided by OMICRON.	
Number of input channels	4	Output voltage	8.5 V DC...18.5 VDC	Vibration	EN 60068-2-6	Frequency range: 10 Hz ... 150 Hz Acceleration: 2 g continuous (20 m/s ²), 10 cycles per axis	Communication protocols
Connector type	BNC	Operating temperature	-40 °C ... +65 °C / -40 °F ... +149 °F	Shock	EN 60068-2-27	15 g/11 ms, half-sinusoid, per axis	Modbus TCP
Frequency range	AC: DC ... 16 kHz PD: 16 kHz ... 30 MHz	Dimensions (W x H x D)	35.8 x 36.8 x 8 cm / 14.1 x 14.5 x 3.1 in.	Protection class	EN 60529	IP 50 (OMS 841) IP 65 (OMS enclosure)	DNP3
Sampling rate	AC: 31.25 kS/s PD: 125 MS/s	Weight	15 kg / 33.1 lb	Electromagnetic compatibility		IEC 61850	
Peak input levels	AC: 200 mA PD: 80 V	Fiber optic connection		Emission		EN 55011/22, 30 MHz ... 3 GHz FCC Subpart B, 30 MHz ... 1 GHz	
Measurement accuracy	AC: ±0.25% (40 Hz < f < 70 Hz) PD: ±5 % (f = 300 kHz, Δf = 150 kHz)	Medium	Standard: Duplex multi-mode fiber optic cables 50/125 μm (OM3 or better) Optional: Duplex single-mode fiber optic cables 9/125 μm (OS1 or better)	Immunity		EN 61000-6-5: MV/HV substations	
Maximum double pulse resolution	< 200 ns	Wavelength	1300 nm	Safety requirements			
PD event time resolution	< 2 ns	Maximum cable length	4 km (multi-mode), 40 km (single mode)	Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use		EN 61010-1	
PD filter bandwidth	9 kHz ... 5 MHz (10 bandwidth settings)	Connector type	LC				
System noise	< 1 pC						
Power supply requirements	24 V DC / 0.5 A						

Figura 4.21: Specifiche tecniche strumento [Fonte25]

• MONGEMO:

MONGEMO è un sistema di monitoraggio di scarica parziale utilizzato per i generatori e motori elettrici. Attraverso la combinazione hardware e software Mongemo permette di monitorare gli eventi di scarica parziale su²⁶:

- Turbo Generatori
- Idro Generatori
- Motori elettrici

Il monitoraggio dello stato di isolamento delle macchine viene eseguito continuamente anche quando le macchine stanno operando.

MONGEMO permette di garantire l'acquisizione multicanale in maniera sincrona e consente la raccolta completa dei dati in modo da ottenere una valutazione completa del monitoraggio.

²⁶ Fonte: file:///C:/Users/utente/Downloads/MONTESTO-200-Brochure-ENU.pdf

Lo strumento impiega anche la soppressione del rumore attraverso tecniche di separazione dei cluster PD in modo automatizzato consentendo di distinguere le diverse fonti di PD e ottenere una valutazione più coerente [Fonte26].

I dati ottenuti vengono raccolti e archiviati in un computer centrale mentre la comoda interfaccia del web consente di accedere facilmente ai dati ottenuti anche da remoto.

MONGEMO si compone di due pacchetti software che includono il monitoraggio e l'analisi delle PD.

Con il software di monitoraggio è possibile impostare soglie di avviso e di allarme e visualizzare i dati ottenuti mentre il software di sistema OMS fornisce strumenti di analisi di PD specialistiche.

COMPOSIZIONE:



1) Condensatori di accoppiamento:

>> Sono progettati per rilevare PD su generatori e motori con tensione nominale fino a 24 kV e presentano capacità che vanno da 80 pF a 2.2 nF.

>> Possono essere posizionati sia orizzontalmente che verticalmente grazie all'elevata resistenza meccanica.

>> Vengono collegati all'unità di acquisizione dati OMS 841 tramite cavi triassiali schermati per ridurre le interferenze esterne [Fonte26].



2) PROTEZIONE INVOLUCRO:

- Protegge il sistema da polvere e umidità
- Presenta porta con serratura per impedire possibili accessi indesiderati
- Porte di ingresso per collegare i condensatori di accoppiamento
- Porte per collegare il cavo in fibra ottica con il computer di monitoraggio [Fonte26]



3) UNITA' DI ACQUISIZIONE OMS 841:

- Permette l'acquisizione di 4 canali dei dati di PD da tutte e tre le fasi
- Larghezza di banda fino a 5 MHz
- Elaborazione sincrona del segnale PD
- Batteria esterna piombo-acido da 12 V permette di colmare interruzioni temporanee di corrente [Fonte26]

4) CONNETTIVITA' IN FIBRA OTTICA:

- Garantisce la connessione dell'unità di acquisizione con il computer centrale
- Fornisce la trasmissione interrotta di dati su lunghe distanze
- Garantisce l'isolamento galvanico
- E' resistente alle interferenze elettromagnetiche [Fonte26]

5)COMPUTER CENTRALE E SOFTWARE DI MONITORAGGIO:

- Gestisce l'archiviazione ed il recupero dei dati
- Gestisce i parametri di monitoraggio e le soglie impostate di allarme
- Visualizza i dati ottenuti e registra i risultati per offrire un maggior approfondimento di analisi
- Esegue la post-elaborazione per fornire informazioni aggiuntive sullo stato di isolamento
- Può essere integrato con altri sensori [Fonte26]

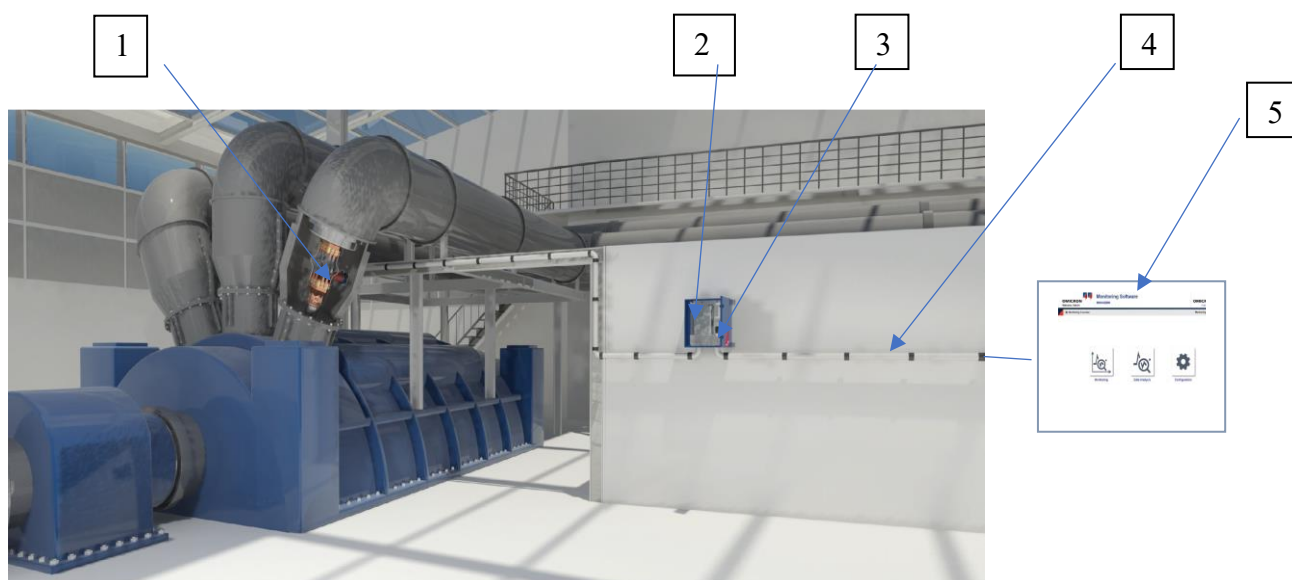


Figura 4.22: Connessione del sistema di monitoraggio su un turbogeneratore [Fonte26]

SOFTWARE PER IL MONITORAGGIO DELLE PD:

Il Software di Monitoraggio permette di configurare il sistema per eseguire il monitoraggio remoto di macchine singole o multiple utilizzando il computer centrale, inoltre il sistema permette di fornire avvisi su attività di scariche parziali molto prima che si verifichino i guasti.

PROCEDURE PER IL MONITORAGGIO:

1)INIZIO:

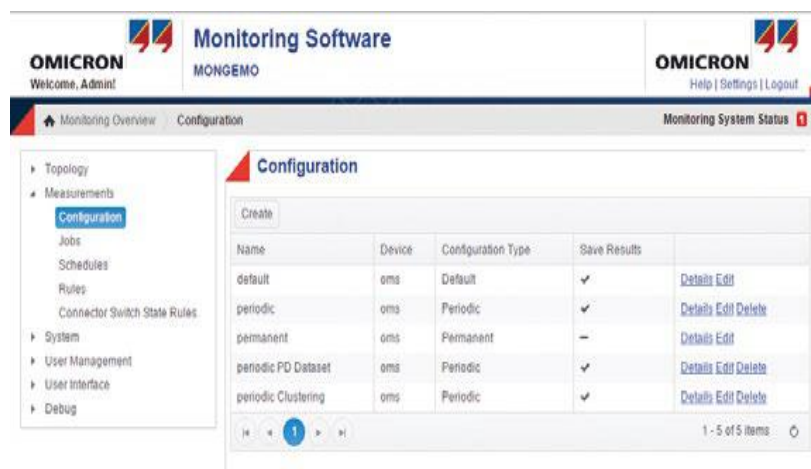
Dashboard del software di monitoraggio:



Si possono selezionare le seguenti attività:

- Impostazione della configurazione
- Visualizzazione della sessione di monitoraggio
- Visualizzazione e analisi di dati di tendenza del monitoraggio

Configurazione e controllo del sistema:

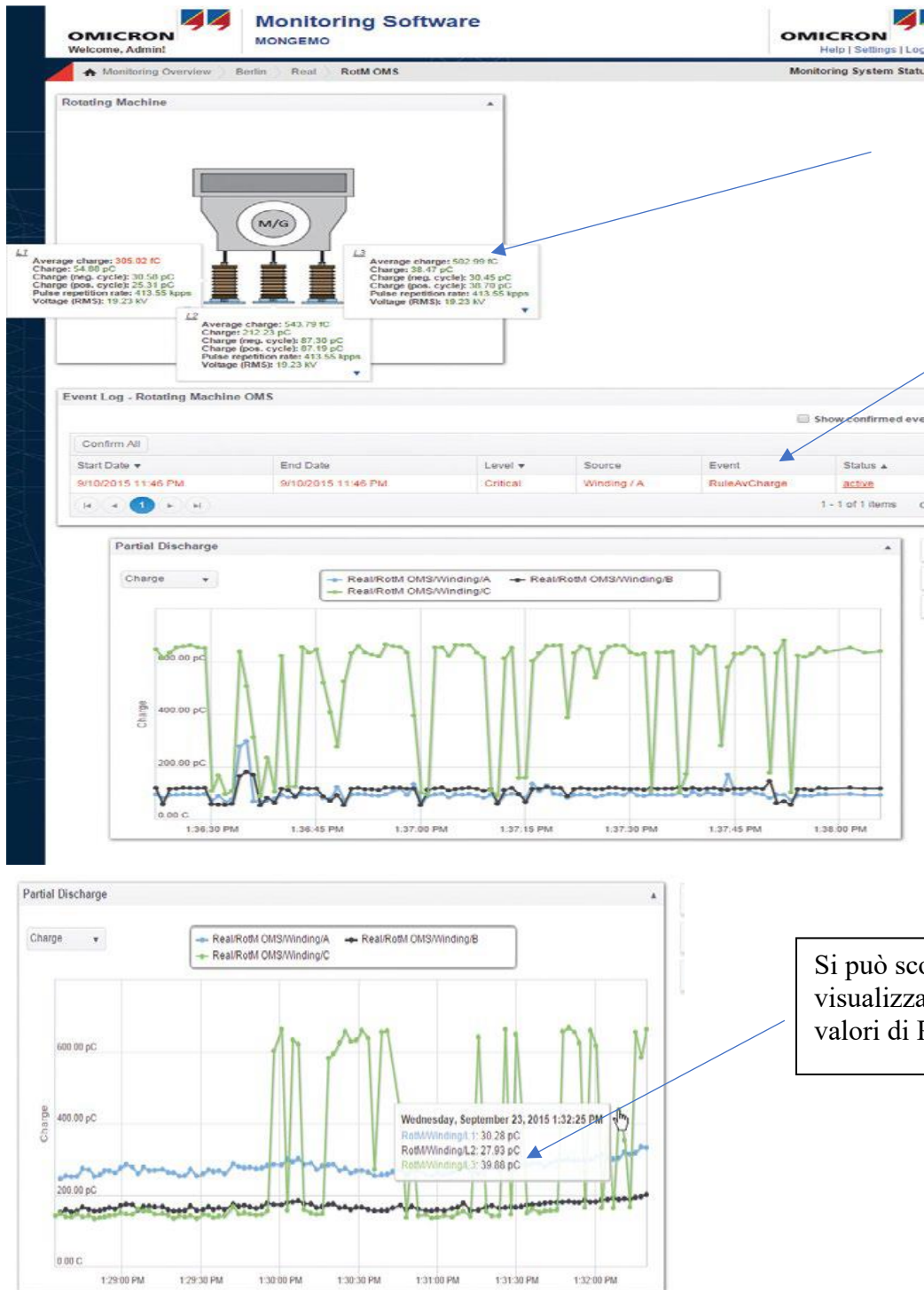


Si possono scegliere le seguenti opzioni:

- Configurazione parametri
- Impostazioni di soglia
- Definizione della registrazione di set di dati PD.

2)VISUALIZZAZIONE DEI DATI PD:

Real Time:



Si visualizzano i valori attuali di PD

Il registro eventi mostra gli allarmi attivati

Si può scorrere i dati per visualizzare la data, l'ora ed i valori di PD per ogni fase

Il sistema fornisce diversi tipi di diagrammi per la visualizzazione dei risultati che permette di scegliere tra:

- >> 3PARD e PRPD
- >> Risultati clustering automatico
- >> Distribuzione degli impulsi
- >> Set di dati PD

Tutto ciò permette una visualizzazione rapida dei dati, tutti i grafici e diagrammi possono essere stampati e salvati su diversi formati.

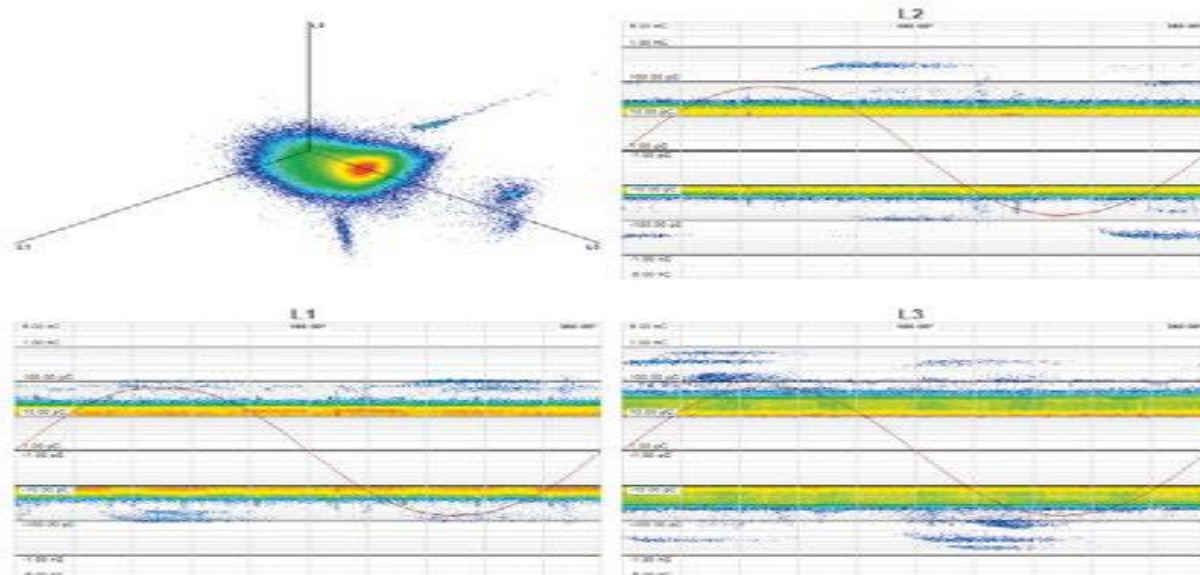


Figura 4.23: Esempi di finestre dei diagrammi 3PAR e PRPD [Fonte26]

3) ANALISI DI ESPERTI DI PD:

L'analisi di esperti di PD viene eseguita quando si vuole avere una diagnosi più dettagliata delle PD.

Tutto ciò viene soddisfatto utilizzando il sistema software OMS che consente di applicare vari filtri per visualizzare in maniera più dettagliata le attività di PD.

La Omicron inoltre offre servizi per un'analisi più approfondita dei dati di PD raccolte e report delle condizioni di monitoraggio nelle macchine, tutto ciò viene aggiunto su richiesta specifica [Fonte26].

Technical specifications

Partial discharge measurements

Number of input channels	4
Connector type	BNC
Frequency range	AC: DC ... 16 kHz PD: 16 kHz ... 30 MHz
Sampling rate	AC: 31.25 kS/s PD: 125 MS/s
Peak input levels	AC: 200 mA PD: 80 V
Measurement accuracy	AC: $\pm 0.25\%$ (40 Hz < f < 70 Hz) PD: $\pm 5\%$ (f = 300 kHz, $\Delta f = 150$ kHz)
Maximum double pulse resolution	< 200 ns
PD event time resolution	< 2 ns
PD filter bandwidth	9 kHz ... 5 MHz (10 bandwidth settings)
System noise	< 1 pC (f = 400 kHz, $\Delta f = 300$ kHz, input range ≤ 320 mV)

Mechanical data – Enclosure with acquisition unit

Dimensions (W x H x D) (cable glands not mounted)	400 x 500 x 210 mm / 15.7 x 19.7 x 8.3 in.
Weight	~ 15 kg / 33 lb.

OMS 841 power supply

24 V DC / 0.5 A

OMS 841 external power supply

AC (max.)	DC (max.)
110 V AC ... 240 V AC / 50/60 Hz / max. 0.28 A	110 V DC ... 300 V DC / max. 0.12 A

Fiber optic connection

Medium	Standard: Duplex multi-mode fiber optic cables 50/125 μ m (OM3 or better) Optional: Duplex single-mode fiber optic cables 9/125 μ m (OS1 or better)
Wavelength	1300 nm
Maximum cable length	4 km (multi-mode), 40 km (single mode)
Connector type	LC

Environmental requirements

Operating temperature	-30 ... +55 °C / -22 ... +131 °F
Storage temperature	-40 ... +80 °C / -40 ... +176 °F
Humidity	Up to 95 % r.H. (non-condensing)
Maximum altitude	4,000 m / 13,123.4 ft.

Vibration, shock and protection class

	Standard	Rating
Vibration	EN 60068-2-6	Frequency range: 10 Hz ... 150 Hz Acceleration: 2 g continuous (20 m/s ²), 10 cycles per axis
Shock	EN 60068-2-27	15 g/11 ms, half-sine, per axis
Protection class	EN 60529	IP 50 (OMS 841) IP 65 (OMS enclosure)

Electromagnetic compatibility

Emission	EN 55011/22, 30 MHz ... 3 GHz FCC Subpart B, 30 MHz ... 1 GHz
Immunity	EN 61000-6-5: MW/HV substations

Safety requirements

Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use	EN 61010-1
--	------------

Software requirements

OMS System Software / Monitoring Software
The minimum system requirements for running the OMS System Software and the Monitoring Software are:
> Windows 7 (64bit), Windows 8 (64bit) or Windows Server 2012 (64bit)
> Processor: Intel i5 2.4 GHz or a comparable x64 processor
> RAM: 4GB
> USB 2.0 high speed port
> Screen resolution (minimum): 1024 x 768 pixels
A central computer that meets these software requirements is provided by OMICRON.

Communication protocols

RS485	ModBus RTU
	Profibus DP
Ethernet/TCP-IP	ModBus TCP
	DNP3
	IEC 60870-5-104
	IEC 61850
	Profinet
	OPC UA

Figura 4.24: Esempio di specifiche tecniche [Fonte26]

TECHIMP

MISURE

• TEV-TRANSIENT EARTH VOLTAGE:

Il sensore TEV è un sensore di scarica parziale che sfrutta il principio di funzionamento dell'accoppiamento capacitivo diretto con un contenitore metallico collegato a terra²⁷.

Le due estremità del sensore possono venire accoppiate direttamente a qualsiasi superficie metallica e grazie a questo raccoglie l'impulso di scarica proveniente dalle superfici metalliche stesse.

Il sensore viene collocato nei quadri grazie all'apertura della scatola metallica del quadro con le due estremità del sensore poste direttamente sulla superficie metallica. Il contatto è assicurato grazie ad un accoppiamento magnetico²⁸.

Il sensore presenta un'alta sensibilità grazie al suo design e la sua composizione compatta e robusta lo rendono ottimale per l'installazione diretta sui quadri in media tensione.



Figura 4.25: [Fonte27]

I benefici che questo sensore fornisce sono:

- **Alta sensibilità**
- **Economico, compatto e robusto**

Mentre gli ambiti di applicazione del sensore sono:

- GIS
- Cavi AT e MT
- Trasformatori di potenza

²⁷ Fonte: <http://www.techimp.com/products/sensors-accessories/item/130-tev-antenna.html?highlight=WYJ0ZXYiLCJzZW5zb3JzIiwidGV2IHNIbnNvcnMiXQ==>

²⁸ Fonte: <https://www.altanova-group.com/public-downloads?download=252:tev-datasheet>

-Quadri in MT e BT



Figura 4.26: Tipica configurazione di connessione del sensore [Fonte: Google]

Esempio di specifiche:

Bandwidth:	0.1 MHz- 300 MHz, stand alone sensor Techimp Frequency Shifter recommended (with PDCheck)
Working principle:	Capacitive coupling
Overall Dimensions:	130 x 70 x 25 mm
Weight (without the RF cable):	80 g
Connector:	BNC
Power Supply:	Only for optional devices (frequency shifter)
Installation:	Coupled to the earthed metallic case of Switchgears
Operational limits:	Env. Temp: 0-650C; Env. RH: 0-100%

[Fonte28]

- **HIGH FREQUENCY CURRENT TRANSFORMER:**



(1)



(2)

Figura 4.27: Sensori HFCT, (1) Diametro Φ 70. (2) Diametro Φ 140²⁹

L'High Frequency Current Transformer è un tipo di sensore induttivo utilizzato per eseguire le misure di scarica parziale nei test online/off line.

Lo strumento può essere connesso con diversi dispositivi utili per ottenere le misure di scariche parziali.

Il vantaggio principale di questo tipo di sensore è che può essere posizionato sulla connessione di terra del sistema da testare senza necessità di disattivarlo³⁰.

Per collegare l'HFCT si usa un connettore BNC e tramite un cavo coassiale da 50 Ω lo si collega all'unità di acquisizione delle scariche parziali.

La freccia presente nello strumento specifica la direzione della tensione di uscita V_{out} rispetto alla direzione della corrente di ingresso I_{in} e quando il sensore viene collegato direttamente con la freccia rivolta verso la giunzione di terra, il segnale di tensione di uscita V_{out} ha la stessa fase della corrente di ingresso I_{in} [Fonte29].

I suoi pregi sono fondamentalmente:

-Sicurezza

-Elevata sensibilità e affidabilità

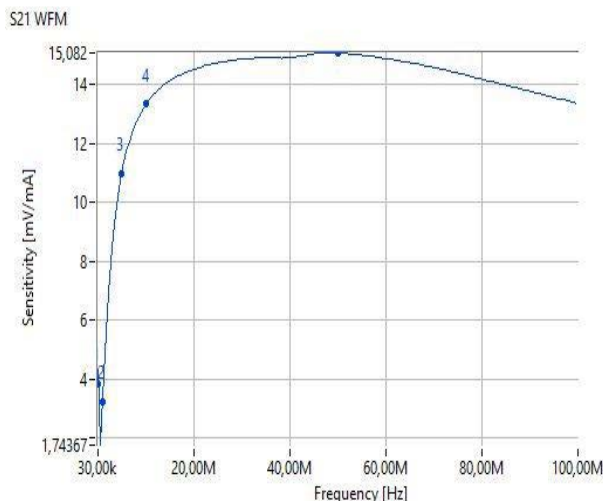
-Robusto e facile da usare

-Assenza di manutenzione

Riporto di seguito un esempio di specifiche di un HFCT 70 mm ed una sua risposta in frequenza:

²⁹ Fonte: http://www.techimp.com/products/sensors-accessories/item/download/101_639b7f9d4b4e9fda77b5cd94a9ff7460.html

³⁰ Fonte: <https://www.altanova-group.com/it/products/partial-discharge-tests/sensors-and-accessories/hfct-140-mm>



Larghezza di banda	1MHz÷80MHz
Sensibilità max.5MHz	19mV/mA
Impedenza di carico	50Ω
Dimensione foro	Φ 70mm
Temperatura di esercizio	-20°C+70°C

Figura 4.28 [Fonte30]

• CAPACITIVE COUPLERS:

Gli Accoppiatori Capacitivi sono utilizzati per fornire informazioni ai vari dispositivi di misura e monitoraggio collegati con essi permettendo di effettuare un'indagine approfondita di quello che accade al punto in cui si origina la scarica³¹.

Sono composti da un soppressore di gas di sovratensione interno che permette di mantenere la tensione di uscita al di sotto dei limiti di sicurezza quando si è in presenza di sovratensione sulle sbarre.

E' stato testato a livello di vibrazione per garantire alta affidabilità nelle condizioni più estreme e può essere installato in varie configurazioni che sono posizione verticale, orizzontale o capovolto.

I suoi pregi sono riassunti nel seguente modo:

- **Dimensioni compatte**, lo rendono molto utilizzato in ambito dei test on line e off line su macchine rotanti, misurazioni e per applicazioni di monitoraggio.
- **Lungo ciclo di vita**, superiore a 10^6 ore.
- **Progettato in maniera mirata per le misure su scariche parziali**, può essere assemblato con altre unità di misura Techimp.

Ambiti di applicazione:

- Macchine rotanti
- Azionamenti a velocità variabile

Un esempio di specifiche del prodotto qui proposto tratta l'accoppiatore capacitivo TCC07 1nF³²:

³¹ Fonte: <http://www.techimp.com/products/sensors-accessories/item/81-pd-coupler.html?highlight=WyjYXBhY2l0aXZlIiwY291cGxlcniMlLCjYXBhY2l0aXZlIGNvdXBsZXJzIl0=>

³² Fonte: <https://www.altanova-group.com/public-downloads?download=11:tcc07-1nf-data-sheet-eng-rev-20180207>

Capacitance	1100 pF $\pm 20\%$
High voltage frequency range	50÷60 Hz
Rated Voltage (phase-to-phase)	7 kVrms
VOU @ Rated voltage	1.1 VRMS
High pass cut frequency (-6dB)	150 kHz
AC voltage withstand	20 kVrms
DC voltage withstand	45 kVpeak
Lightning pulse withstand	65 kVpeak
Creepage distance (IEC60815)	>140 mm (medium level pollution)
Tan δ	< 1.0 %
PD level @8kV / 50Hz	<5 pC

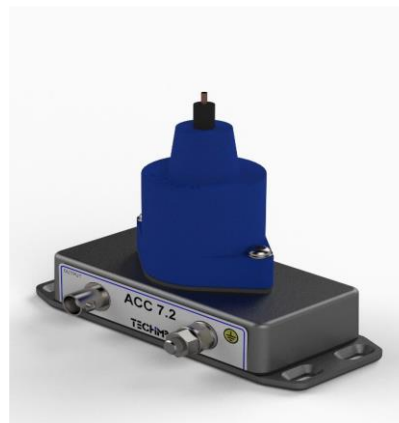


Figura 4.29: [Fonte32]

MONITORAGGIO

• AQUILA:

Techimp Aquila è un'unità di acquisizione portatile progettato per offrire caratteristiche che permettono di eseguire la diagnostica, il monitoraggio di una PD³³.

Grazie alla connettività multipla integrata nei sistemi di rilevamento PD Techimp come Wi-Fi, fibra ottica, USB, Bluetooth e alimentatore lo rendono uno strumento potente per questo tipo di applicazione e inoltre può essere utilizzato nelle condizioni più estreme.

L'unità di batteria del dispositivo consente di eseguire test fino a 20 ore senza necessità di alimentazione ausiliaria e la sua configurazione semplice e veloce garantisce operazioni di misura in pochi minuti.

Insieme alla giusta combinazione di sensori e filtri può essere utilizzato per il collaudo di cavi AT e MT, trasformatori di potenza e distribuzione, motori e generatori, quadri GIS e MT.

Aquila inoltre può essere applicato per eseguire misure on-line e off-line di qualsiasi risorsa elettrica a qualsiasi livello di tensione e forma d'onda, inoltre può essere utilizzato per ottenere un sistema di monitoraggio permanente [Fonte30].

Offrendo il collegamento tramite fibra ottica è possibile eseguire verifiche tramite la rete di acquisizione in diversi punti di misurazione.

Il software di acquisizione offerto dall'unità permette di impostare i parametri di acquisizione e visualizzare i dati ottenuti in modo da fornire una panoramica sulla diagnostica da eseguire³⁴.

I suoi benefici sono:

-Garantisce misure on-line e off-line

-Può essere applicato su cavi, trasformatori, macchine rotanti e quadri

-Strumento innovativo per la registrazione e l'elaborazione delle PD

³³ Fonte: <http://www.techimp.com/products/acquisition-units/item/197-aquila.html?highlight=WYJhcXVpbGEiXQ==>

³⁴ Fonte: <https://www.altanova-group.com/it/products/partial-discharge-tests/acquisition-units/aquila>

- Presenta una banda ultra-larga
- Compatto
- Connettività multipla



Figura 4.30: Esempio di un'unità di acquisizione Aquila [Fonte33]

Un esempio di specifiche dell'unità di controllo sono riportati di seguito:

Wide Band Acquisition PD channel

PD Technology	UWB - PRPD/TF map
PD Channels	3 biased UWB Channels for active sensors power supply (expandable To 6)
Bandwidth	16kHz-30MHz, built in UWB filter
Resolution	10 bit
Dynamic range	75 dB
Maximum sampling frequency	100 MS/s
Input voltage range	1-4000 mVpp
Input sensitivity	< 1.0 mVpp
Input Impedance	50 Ohm
Recording time length	1 μ s (min) 20 μ s (max)
Connectors type	BNC

Synchronization channel

Input voltage range	0.2 - 200 V _{RMS}
Frequency range	0.1 ÷ 1000 Hz
Input Impedance	10 MOhm
Connector type	BNC

Connectivity

Type	For monitoring: Wi-Fi (IEEE 802.11g) + Ethernet Fiber Optics connection, For instrument setup: Bluetooth For maintenance and FM upgrade: USB
------	--

Display

Type	11" tablet Windows 10 (for set-up and acquisition)
------	--

Casing

Dimensions	410 x 345 x 205 mm
Weight	< 12 kg
IP Degree	IP42 cover Close IP30 cover Open

Power Supply

Voltage	100 - 240 VAC 50/60 Hz
Outputs for accessories	5V (max 5 W) via USB-A connector 12 V (max 5W)
Battery	2 x 10,8V, 8 Ah With smart diagnostic system
Autonomy	> 8 hours*

Operating environmental conditions

Temperature	0 to 60 °C **
Humidity	90%, not condensing

General

Firmware	updating via USB
Certifications	IEC 60270 compliance EN 61326-1 EN 61010-1

(*) Depending on continuous/discontinuous usage
(**) 0 to 45 °C when battery is charging

Figura 4.31: [Fonte34]

• PD SCOPE:

Lo strumento di acquisizione PDScope offerto dalla Techimp viene utilizzato come strumento di monitoraggio delle PD su cavi AT e MT, generatori, GIS, interruttori e trasformatori³⁵.

L'unità di acquisizione viene assemblato insieme ad altri sistemi di monitoraggio Techimp come il sistema PDHub consentendo la reiezione del rumore preliminare e offrendo alte capacità al sistema in termini di calcolo automatico dei parametri statistici relative alle scariche parziali e velocità di campionamento [Fonte32].

La Techimp con la sua tecnologia permette di separare le diverse tipologie di scarica parziale in base alla loro forma di impulso in modo da poterle analizzare in maniera approfondita separatamente su diversi pacchetti dati aumentando così la probabilità di riconoscere la sorgente di scarica.

La composizione del sistema di monitoraggio prevede il collegamento del PDScope con 3 o 6 sensori PD tramite cavi coassiali e acquisirà i segnali provenienti dai sensori di PD³⁶.

Lo strumento è dotato di un sistema di acquisizione da 100 MS/s, con tre canali indipendenti, un canale di sincronizzazione e con un'interfaccia Ethernet standard da 10/100 Mb.

Il sistema si basa su una grande memoria di grande larghezza di banda per scopi di acquisizione e acquisisce forme d'onda complete di un elevato numero di segnali rilevati in modo da caratterizzare gli impulsi, migliorare il rapporto segnale/rumore[Fonte33].

CARATTERISTICHE:

- Strumento innovativo per registrazione ed elaborazione delle PD
- Fornisce ottima registrazione, memorizzazione ed elaborazione delle PD
- Elaborazione rapida a banda larga e grande unità di acquisizione della memoria
- Ideale per il monitoraggio periodico e permanente di attività elettriche trifase.
- Ottimo per rilevare impulsi e analizzare le varie forme d'onda
- Si basa su strumenti diagnostici a logica fuzzy ad elaborazione statistica
- Unità di acquisizione digitale compatta a 3 canali simultanei [Fonte36]

BENEFICI:

- **Rifiuto automatico del rumore basato su tecnologia Techimp**
- **Tecnologia Ultra Wide Band con risoluzione da 16 kHz a 30 MHz e 10 bit**
- **Controllo remoto Intranet/Internet**
- **Doppia fibra ottica integrata ed interfaccia Ethernet 10/100 Mb/s.**

SPECIFICHE:

³⁵ Fonte: <https://www.altanova-group.com/it/products/partial-discharge-tests/acquisition-units/pd-scope>

³⁶ Fonte: <https://www.altanova-group.com/public-downloads?download=1235:pdscope-datasheet>

Wide Band Acquisition PD channel

PD Technology	UWB - PRPD/TF map
PD Channels	3 based UWB Channels for active sensors power supply (expandable To 6)
Bandwidth	16kHz-30MHz, built in UWB filter
Resolution	10 bit
Dynamic range	75 dB
Maximum sampling frequency	100 MS/s
Input voltage range	1-4000 mVpp
Input sensitivity	< 1.0 mVpp
Input Impedance	50 Ohm
Recording time length	1 μ s (min) 20 μ s (max)
Connectors type	BNC

Synchronization channel

Input voltage range	5 - 200 V _{RMS}
Frequency range	0.1 ÷ 1000 Hz
Input Impedance	10 MOhm
Connector type	BNC

Communications and Connections

Physical Interface	Ethernet 10/100 Mb/sec
External Connections	n° 4 BNC Type connectors n° 1 external synchronous interface for channel expansion multiplexer n° 2 Standard ST FO connectors n° 1 Clean (SPDT) Contact connector

Operating environmental conditions

Temperature	5÷50°C;
Humidity	90%, not condensing
Altitude	≤2000 meters

Figura 4.22: [Fonte36]



Figura 4.23: [Fonte35]

HIGHVOLT

MISURE

- **PiDAS MPD 600:**



Figura 4.24: Fonte Google

Il sistema di misura PiDAS MPD 600 è un sistema di analisi di scarica parziale che offre una tecnologia di elaborazione digitale di elevata risoluzione e un'ottima precisione di misurazione³⁷.

Le molteplici applicazioni di tale strumento riguardano le misure sui trasformatori trifase, cavi, GIS e GIL, inoltre il sistema di misurazione, oltre al rilevamento per mezzo di un accoppiamento capacitivo, sfrutta il rilevamento tramite sensore Ultra High Frequency e ad ultrasuoni [Fonte37].

In questo modo è possibile offrire al sistema unità di sensori separati e strumenti software di acquisizione dati adatti al ruolo.

-CIRCUITO DI MISURA:

³⁷ Fonte: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/6-50-3.pdf>

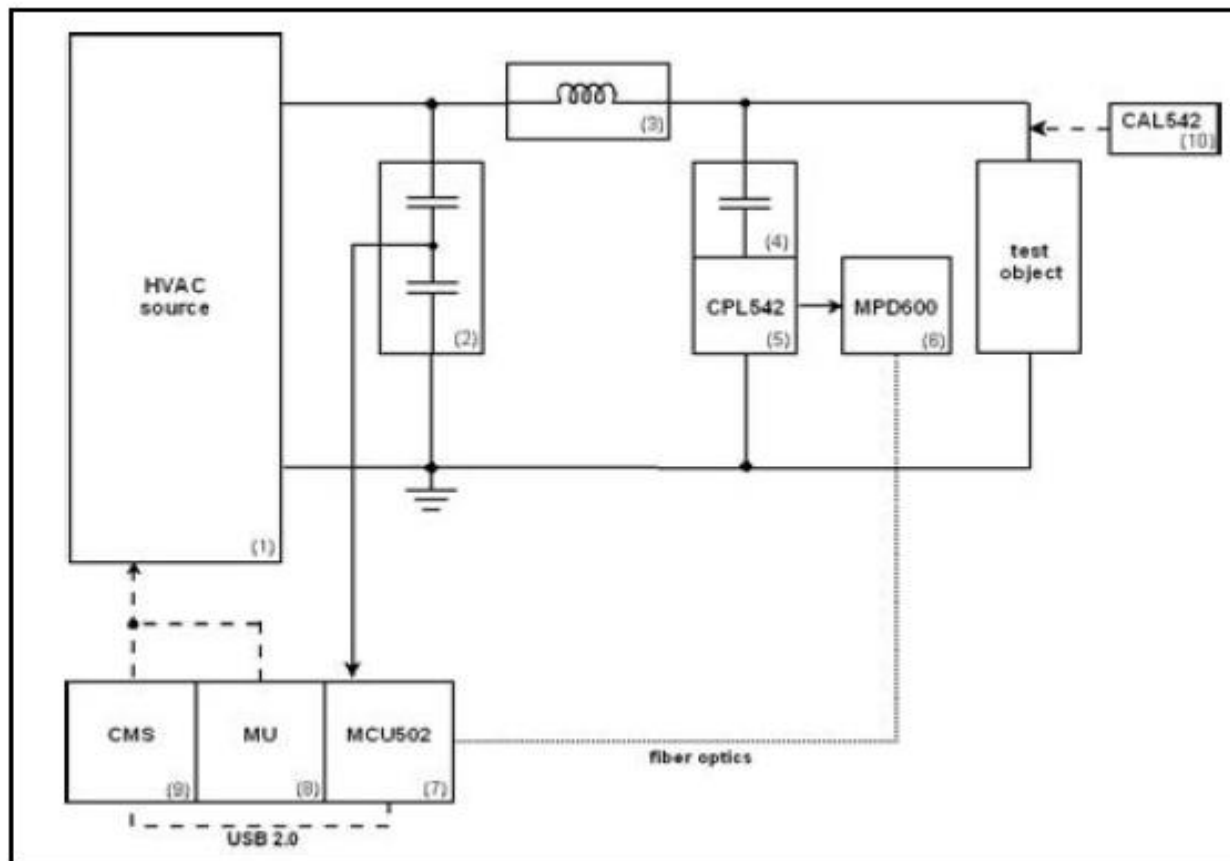


Figura 4.25: Circuito di misura in accordo con la norma IEC 60270 [Fonte37]

Nel circuito di misura sono presenti i seguenti componenti:

- (1) Sorgente di tensione
- (2) Divisore di tensione
- (3) Impedenza di blocco
- (4) Condensatore di accoppiamento
- (5) Impedenza di misurazione
- (6) Unità di acquisizione
- (7) Unità di controllo
- (8) Voltmetro di picco
- (9) Controllo computer
- (10) Calibratore

L'unità di misura PiDAS MPD 600 è costituito da un'unità di controllo gestita da un computer (7), esempio MCU 502, 504 o 550 e una o più unità di acquisizione (6) tipo MPD 600 connesse tramite fibra ottica.

Le unità di acquisizione sono connesse a un sensore e hanno batterie tipo MPP 600.

I rilevatori di PD alimentati a batteria possono essere posizionati vicino al dispositivo di accoppiamento (4) permettendo di ridurre la lunghezza di connessione tramite BNC e la possibile presenza di rumore e fenomeni di interferenza.

Di seguito riporto un tipico circuito di misura realizzato su un cavo:

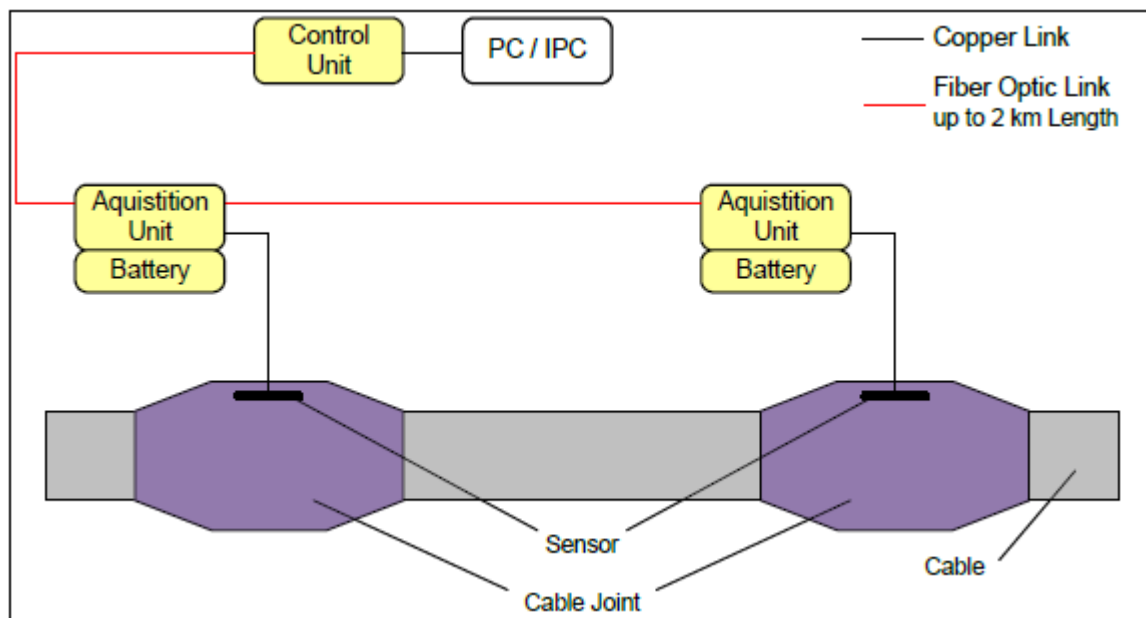


Figura 4.26: [Fonte37]

Come si osserva i sensori sono connessi alle unità di acquisizione per fornire i segnali di scariche parziali, le unità di acquisizione connesse in serie forniscono i dati all'unità di controllo che gli elabora e li manda ad un computer.



-UNITA' DI ACQUISIZIONE PiDA MPD 600:

Le unità di acquisizione (6) sono collegate per mezzo di tecnologia in fibra ottica all'unità di controllo ed è possibile collegare più unità di acquisizione per eseguire la misurazione multicanale sincrona.

Le sorgenti di alimentazioni per questi tipi di sistemi prevede alimentatori tipo PiDA MPP 600 [Fonte37].

Riporto di seguito delle specifiche tecniche di tale sistema:

Material	Extruded aluminium
Dimensions (mm)	110 (W) x 190 (D) x 44 (H)
Power supply	8 - 12 V DC Power consumption: 4 W (max.) < 10 mW (idle)
Indicators	LED for stand-by, power, status, data integrity
Connectors	2 x fiber optical network 1 x PD input (BNC) 1 x Voltage input (BNC)
Input frequency range	Voltage: 0 Hz - 4.3 kHz PD: 0 Hz - 20 MHz
Input impedance	Voltage: 1 μ F / 1 M Ω PD: 50 Ω
Input voltage	Voltage: 60 V rms (max) PD: 10 V rms (max)

Figura 4.27: Fonte [37]



-UNITA' DI CONTROLLO PiDA MCU 502:

L'unità di controllo PiDA MCU 502 viene collegato tramite USB ad un PC o laptop e non si necessita di nessun'altro elemento aggiuntivo [Fonte37].

La presenza di un trigger incorporato permette di eseguire la sincronizzazione con la frequenza di alimentazione.

Un esempio di specifiche tecniche di tale sistema è:

Material	Extruded aluminium
Dimensions (mm)	110 (W) x 180 (D) x 30 (H)
Power supply	Bus powered via USB
Connectors	USB 2.0, fiber optical network
Indicators	1 LED (USB connection / Error)
Light sensitive trigger	50 - 60 Hz

Figura 4.2.7: Fonte [37]

BATTERIA PiDA MPP 600:

La batteria integrata con l'unità di acquisizione permette di fornirle energia necessaria per circa 8 ore.

Specifiche tecniche:

Material	Extruded aluminium
Dimensions (mm)	110 (W) x 170 (D) x 28 (H)
Battery type	11 V, 4.8 Ah, Li-On Rechargeable

Figura 4.28: [Fonte37]

-SOFTWARE DI BASE iDAS:

Il software iDAS permette di gestire simultaneamente tutte le unità di acquisizione registrate e visualizzare tutti i dati registrati e valutati in tempo reale [Fonte37].

Il software esegue una valutazione semplice e veloce del livello di PD in base ai requisiti richiesti come ad esempio EN, IEC o standard del produttore e l'archiviazione dei dati e la generazione di registrazione dei test può proseguire automaticamente.

Consente un'ampia analisi off-line senza tenere conto dei vincoli computazionali in tempo reale ed è progettato per funzionare in un ambiente integrato insieme al controllo HIGHVOLT rendendo la misurazione completamente automatica della scarica parziale.

Oltre al software di base sono presenti anche diversi software aggiuntivi come:

- **iDAS-TRA**: per i test sui trasformatori
- **iDAS-CAB**: pacchetto software per eseguire misure sul cavo
- **iDAS-CAB Factory**: interfaccia espansa che permette di ridurre possibili errori durante il funzionamento offrendo inoltre opzioni di visualizzazione più dettagliate.

- **iDAS-CAB-OnSite**: presenta opzioni aggiuntive che permettono di ridurre i rumori con l'aiuto di filtri ad alta frequenza.

MONITORAGGIO

- **PARTIAL DISCHARGE DETECTOR: ICMcompact**



Figura 4.29: Rappresentazione del sistema di misura ICMcompact³⁸

Il sistema di misura ICMcompact è stato progettato per misurare quantità come la tensione di innesco e la tensione di estinzione nei circuiti di misura in accordo con la IEC 60270.

ICMcompact in caso di misurazioni standard può essere adattato anche per diversi oggetti di prova e la sua facile trasportabilità, il facile modo di funzionare lo rendono utile per i test di PD di routine in diversi campi di applicazione industriali.

L'ICMcompact amplifica e integra l'impulso attuale in carica apparente, gli impulsi di carica analogici vengono convertiti in valori digitali ed elaborati in base alla modalità di operamento selezionata.

³⁸ Fonte: <https://www.highbvlt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/6-21-3.pdf>

L'ICM compact può essere sincronizzato con la tensione di prova ed i risultati vengono visualizzati su un'interfaccia predefinita.

La calibrazione e la selezione degli intervalli di guadagno, la regolazione della scala sono forniti automaticamente da un algoritmo di scala automatica [Fonte38].

-CIRCUITO DI MISURA:

Per eseguire le misure in accordo con la IEC 60270 l'oggetto di prova viene collegato con una sorgente HVAC nel seguente modo:

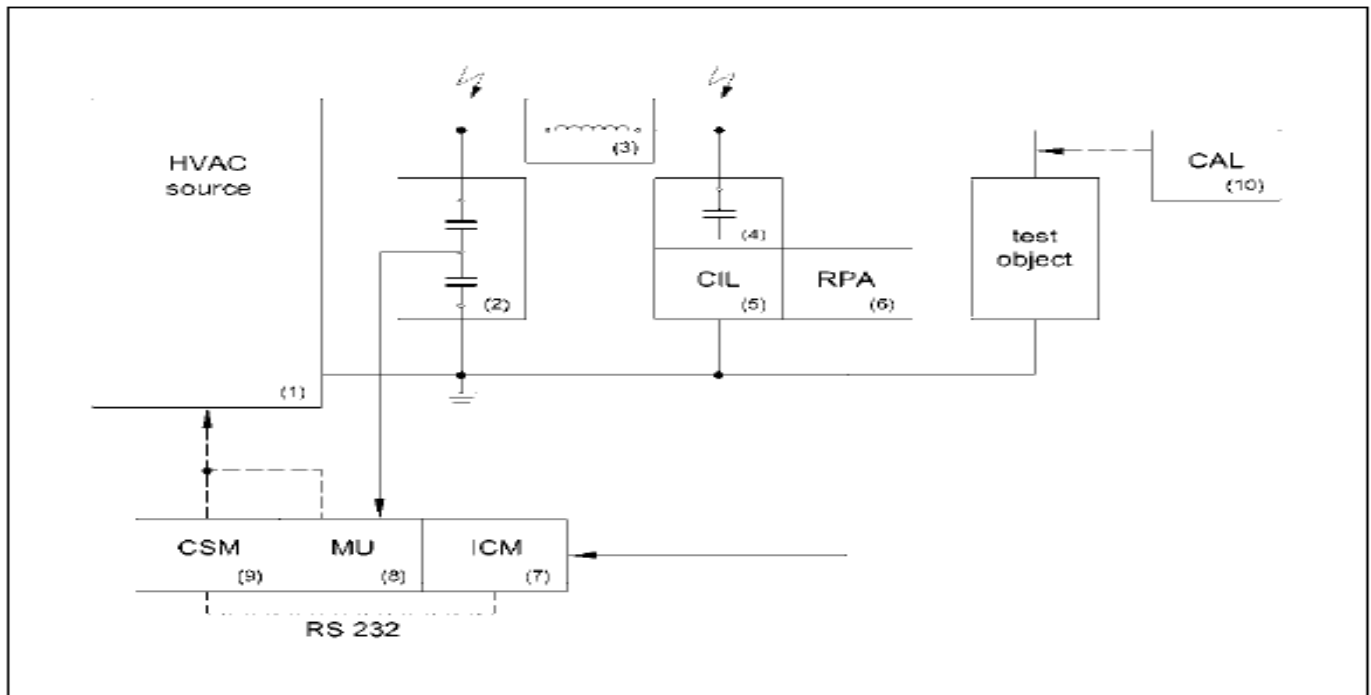


Figura 4.30: Circuito di misura [Fonte38]

Il circuito è costituito dai seguenti dispositivi:

- (1): Sorgente di alimentazione: Circuito AC con trasformatore di prova o circuito risonante AC
- (2): Partitore di tensione capacitivo: può venire realizzato collegandolo al passante del trasformatore o dal reattore di prova.
- (3): Impedenza di blocco
- (4): Condensatore di accoppiamento: permette di bloccare i segnali di rumore HV e fornisce un circuito a bassa impedenza per i segnali di PD, la sua capacità non deve essere inferiore a 1/10 di quella dell'oggetto di prova.
- (5): Impedenza di misura: può essere di tipo CIL e CIT, può essere posizionato nella connessione di terra del condensatore di accoppiamento o nell'oggetto di prova e deve essere scelta in base alla capacità di accoppiamento e alla corrente circolante nell'impedenza.
- (6): Preamplificatore: di tipo RPA, è collegato attraverso un cavo coassiale al rilevatore di PD.
- (7): Rilevatore di PD: il preamplificatore condiziona il segnale in base all'intervallo di frequenze di misura scelto e lo amplifica in modo da migliorare il rapporto segnale-rumore, inoltre fornisce una protezione dalle sovratensioni.
- (8): Voltmetro di Picco
- (9): Sistema di controllo CSM
- (10): Calibratore esterno: di tipo CAL, inietta un impulso di carica nella terminazione dell'oggetto di prova [Fonte38].

-MODALITA' OPERATIVE:

Lo strumento presenta un'interfaccia semplice a pulsante che permette all'operatore di selezionare differenti modalità operative come:

- **PD charge meter:** fornisce la visualizzazione digitale e quasi analogica della carica apparente in accordo con la IEC 60270. Il guadagno può essere configurato in maniera manuale o automatica e la registrazione della carica apparente viene resa disponibile grazie ad un connettore BNC sul retro del rilevatore.

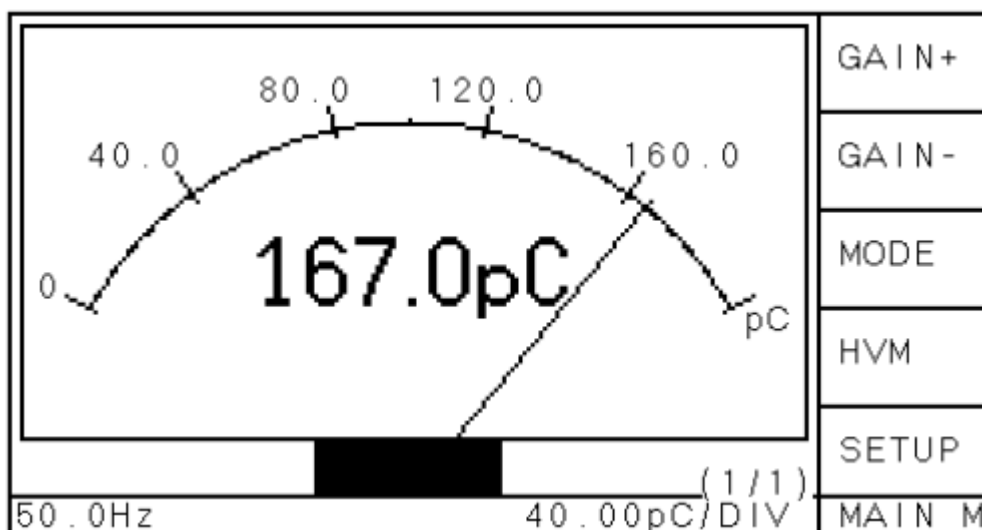


Figura 4.31: METER MODE [Fonte38]

- **Scope-like Display:** permette di mostrare gli impulsi della carica apparente sovrapposti alla tensione applicata (modalità SINE) o sulla linea zero interna (modalità NORM) per eseguire l'analisi diretta.

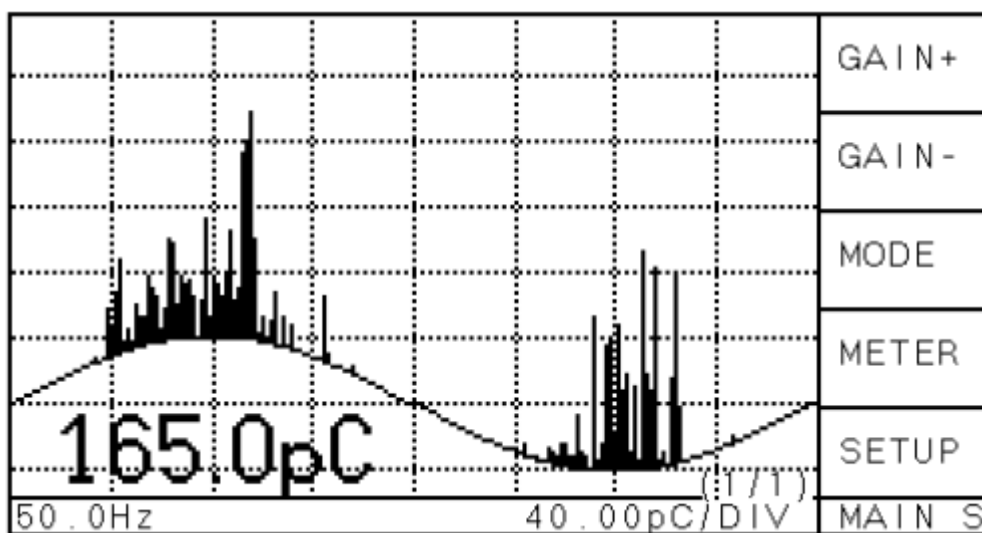


Figura 4.32: NORM MODE Fonte [38]

- **Phase-resolved pattern (HOLD MODE):** permette di fornire le ampiezze dell'impulso della PD in base alla loro posizione di fase per un tempo di misurazione regolabile, rappresenta inoltre uno strumento utile per identificare errori sulle PD.

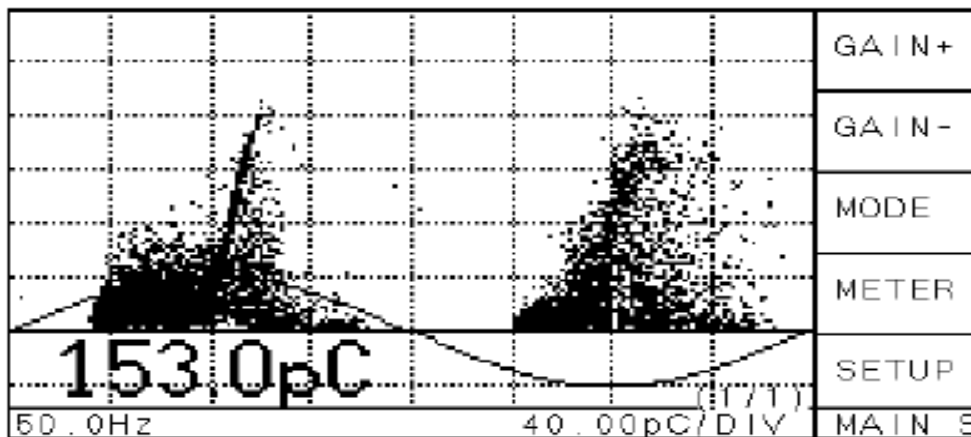


Figura 4.33: HOLD MODE [Fonte38]

- **Additional Mode:**

-PD fault location: Applicati maggiormente nei cavi

-Comando TTL di impulsi di commutazione rapidi di IGBT pilotati: per apparecchiature e sistemi di prova risonanti sintonizzati in frequenza.

-Misurazione PD ad altissima frequenza: per applicazioni su GIS e GIL

-Misurazioni ad ultrasuoni di PD: applicazioni su GIS

-CARATTERISTICHE DI PROGETTO:

1. **Caratteristiche meccaniche:** i collegamenti dello strumento sono sul lato posteriore mentre la misura viene visualizzata su uno schermo LCD integrato sul lato anteriore. Le impostazioni e le configurazioni delle specifiche di misura sono offerte mediante pulsanti.
2. **Caratteristiche elettriche:** l'insieme del sistema ICMcompact, impedenza di misura e preamplificatore costituiscono un sistema a banda larga con frequenze limite da 40 kHz a 800 kHz.
3. **Riduzione interferenze:** la presenza dei rumori possono essere ridotti attraverso i seguenti modi di operamento:
 - Discriminatore inferiore regolabile: permette di sopprimere i segnali periodici bassi
 - Coppia di finestre di fase: la larghezza e la posizione di fase sono regolabili per permettere la soppressione di impulsi di rumore stabili in fase.

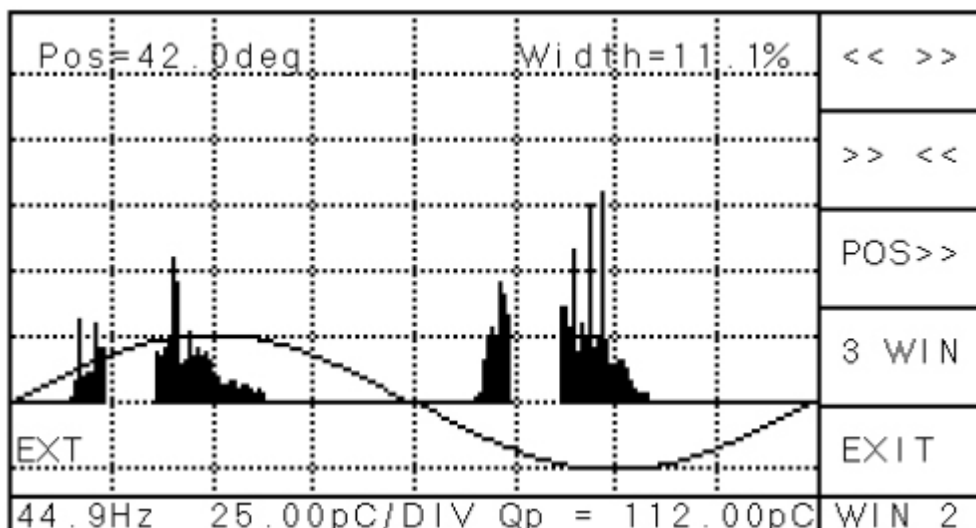


Figura 4.34: Phase Window [Fonte38]

- Analogico automatico: per eliminare presenza di rumori stocastici rilevati da un'antenna o da un trasformatore di corrente di tipo clamp-on.
- Applicazione dell'Adattatore a ponte attivo, dell'impedenza di accoppiamento differenziale o sistema di trasmissione ottica.

ESEMPIO DI SPECIFICHE DELLO STRUMENTO:

auto-range function, also logarithmic scale	
frequency band (6 dB)	40 ... 800 kHz
(smaller ranges available)	
pulse repetition rate	≤ 125 kHz
(superposition error <10%)	
input impedance (without RPA)	50 Ohm
BNC input for test voltage reference	
of test voltage frequency	20 ... 300 Hz
of reference level / at input	≤ 100 V rms
with impedance	5 M Ω / 200 pF
BNC input for automatic gating	
BNC input for TTL gating	
power supply (mains)	
voltage	85...264 V _{AC}
frequency	47-440 Hz
power	~20 W
dimensions (W x D x H)	236 x 295 x 133 mm
weight	approx. 3 kg
temperature range	10 ... 40 °C

[Fonte38]

TECNOLOGIA PRY-CAM:

Prima di parlare dei sistemi di misura e monitoraggio offerti dalla PRYSMIAN voglio spiegare su che tecnologia si basano questi sistemi ovvero la tecnologia PRY-CAM.

La PRY-CAM sfrutta le possibilità offerte dalla Internet of Things dove i dati di misurazione e dei parametri di valutazione vengono archiviati tramite il cloud privato permettendo di accedervi e condividerli da remoto³⁹.

La tecnologia PRY-CAM permette di eseguire misure online, diagnosi e localizzazione dei difetti da remoto, permette di eseguire la raccolta dei dati in tempo reale e senza competenze specifiche.

Il sistema PRY-CAM integrato con sistemi di monitoraggio permette di realizzare prodotti PRY-CAM che sono installati nello stesso armadio e ogni soluzione PRY-CAM SYSTEM può essere adattato alle configurazioni richieste dai clienti in modo da soddisfare le strategie di manutenzione e gestione delle risorse [Fonte39].

Il PRY-CAM Cloud permette di raccogliere tramite dispositivi PRY-CAM le misure eseguite e vengono memorizzati in maniera sicura sul proprio cloud e utilizzati nuovamente per eseguire diagnostica.

Per eseguire la diagnostica su scariche parziali la PRY-CAM utilizza un algoritmo ad intelligenza artificiale chiamata PRY-CAM BRAIN ed il sistema genera impulsi di allarme in tempo reale ogni volta che avvengono malfunzionamenti o condizioni critiche [Fonte39].

I prodotti offerti dal sistema sono:



PRY-CAM PORTABLE:

Esegue le misure online delle PD[Fonte39]



PRY-CAM GATE:

Esegue le misure delle PD su cavi e giunti in AC[Fonte39]



PRY-CAM MINILOG:

Esegue differenti misure di parametri come pressione, tensione, ecc.. [Fonte39]

³⁹ Fonte: https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/PRY-CAM_GENERAL_BROCHURE_A4.pdf



PRY-CAM GRIDS

Esegue il monitoraggio permanente delle PD in AC[Fonte39].



PRY-CAM LINKBOX

Dispositivo contenente sensori e prodotti elettronici in grado di fornire informazioni diagnostiche su PD, corrente di guaina,ecc., tramite fibra ottica[Fonte39].



PRY-CAM HARVESTER

Dispositivo utilizzato per alimentare il sistema di monitoraggio quando non è disponibile una connessione di alimentazione sul sito[Fonte39].



PRY-CAM INFRARED

Sensore basato su tecnologia a infrarossi che rileva la temperatura di dispositivi[Fonte39].



PRY-CAM WINGS

Sensore capace di eseguire misure di PD e temperatura di sistemi in AC[Fonte39].



PRY-CAM D-LOG

Dispositivo multicanale capace di eseguire misure di parametri analogici (temperatura, pressione, correnti, inondazioni, fumo, ecc..) [Fonte39].



PRY-CAM OZON:



PRY-CAM DAS:



PRY-CAM DTS:

Sensore capace di eseguire la misura di ozono su un'area contenente un dispositivo[Fonte39].

Dispositivo con sensori a tecnologia acustica per misure di rumore in vicinanza di un cavo[Fonte39].

Dispositivo con sensori che utilizzano tecnologia a temperatura distribuita che permette di eseguire la misura di temperatura lungo il cavo o all'interno di esso[Fonte39].

MISURE

• **PRY-CAM PORTABLE:**

La tecnologia PRY-CAM si basa su una tecnologia wireless rivoluzionaria che consente di eseguire misure di PD online, ovvero, senza necessità di spegnere il sistema monitorato⁴⁰.

I campi di applicazione sono:

- CAVI
- QUADRI
- TRASFORMATORI
- MACCHINE ROTANTI

PRY-CAM PORTABLE è uno strumento portatile utilizzato per l'acquisizione, l'elaborazione e la classificazione automatica di segnali di impulsi generati dalle PD che possono avvenire nei materiali isolanti di sistemi e apparecchiature elettriche di MT e AT quali i trasformatori, macchine rotanti, quadri e cavi.

Il suo principio di funzionamento si basa sul rilevamento delle onde elettromagnetiche emesse dalla PD senza necessità di interrompere il servizio.

Permette di offrire un'istantanea condizione dell'oggetto monitorato grazie ad un'interfaccia visiva ottima e la pre-diagnosi fornita si basa su un'intelligenza artificiale chiamata PRY-CAM BRAIN.

Grazie alla trasmissione wireless dei dati, insieme alle connessioni galvaniche presenti, offre la massima sicurezza per l'operato.

Il sistema inoltre offre le seguenti caratteristiche:

- Frequenza di campionamento molto elevata e capacità di filtraggio evolute
- I risultati di misurazione delle PD vengono presentati con forme d'onda (analisi nel dominio del tempo) e spettro di frequenze (analisi nel dominio della frequenza).
- Sensore con sonda capacitiva con tecnologia UWB (Ultra Wide Band).
- Riduzione del rumore migliorata
- Alta sensibilità e direttività [Fonte40]

⁴⁰ Fonte: https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/PRY-CAM_Portable_brochure_A4.pdf

MODALITA' DI OPERAMENTO:

1. **BASE:** Il PRY-CAM PORTABLE può essere utilizzato come un topografo affidabile e schema PD semplificato.
2. **ADVANCED:** Fornisce il modello di misura delle PD per una diagnosi semplice.
3. **PREMIUM:** Fornisce l'intero modello delle PD attraverso le forme d'onda e lo spettro di frequenze per ogni impulso di PD.

E' possibile passare dalla modalità BASE a ADVANCED o PREMIUM per offrire una diagnosi più dettagliata quando e come serve.



Figura 4.35: [Fonte40]

Technical specifications

Sensor type: Electromagnetic sensor, based on a patented Ultra Wide Band (UWB) active capacitive probe

Sampling frequency: 200 MS/s

Bandwidth: 100 MHz

PD sensitivity: 1 pC

Synch frequency: From 10 Hz to 1 kHz

Processing: Real-time filtering capabilities

Communication interfaces:
Wireless 802.11 b/g (Wi-Fi)

AC synchronisation source: Electric field, magnetic field, light, auxiliary/external

Internal battery: Li-Po 7.4 V, 2200 mAh
Autonomy approx. 6 hours

Working temperature: From -25°C to 70°C

Weight: 530 g

Dimensions: 175 × 125 × 70 mm (L × W × H)

Case: Carbon Fibre

• **PRY-CAM GATE:**

Il PRY-CAM GATE è un dispositivo fisso utilizzato per la misurazione continua delle PD sui giunti dei cavi sia in AC che DC.

Tale sistema utilizza un dispositivo elettronico in grado di generare onde radio o microonde di elevata potenza⁴¹.

All'interno di tale dispositivo è presente un amplificatore che permette, una volta entrato il segnale nel dispositivo, di incrementarne la potenza.

Lo strumento viene applicato in installazioni online ed è distribuibile con diagnosi automatica.

Il PRY-CAM GATE viene integrato con la piattaforma PRY-CAM cloud e presenta diversi modi di connettività dei dati per la telecomunicazione e l'accesso.

Un pregio di tale strumento è l'assenza di connessione galvanica e viene assemblato con i sensori PRY-CAM-WINGS che vengono installati nei giunti del cavo.

Lo strumento è reso disponibile sul mercato solo per applicazioni DC e la trasmissione via cavo dei dati assemblata ad un'installazione fissa riduce i requisiti di manodopera diretta per le misurazioni.

Grazie ad un approccio semplificato dell'analisi delle PD offerto dallo strumento non richiede grandi competenze di analisi specifiche e i tempi diagnostici sono brevi per i dati rilevati.

Presenta una facile installazione e la rivelazione delle PD è molto affidabile e viene adattato a qualsiasi sistema di cavi di alimentazione da 3 kV a 600 kV [Fonte41].



Figura 4.36: [Fonte41]

SPECIFICHE TECNICHE:

⁴¹ Fonte: https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/01_scheda_GATE.pdf

PD sensitivity: down to 1pC

Communication Interfaces: RS485; Optional: F.O.; Ethernet

Working Temperature: from -25 °C to 70 °C

Power supply: 12 V/ 24 V DC <1 W

Resolution: 90 ps or less than 20 cm

Inputs: 2 independent channels (2x2 sensors)

Acquisition rate: 10.000 pulse per second (pps)

Enclosure: Rugged IP 66/67 aluminium

Enclosure size: 220x145x60 mm

Figura 4.37: [Fonte 41]

MONITORAGGIO

- **PRY-CAM GRIDS:**

Il PRY-CAM GRIDS è un dispositivo utilizzato per il monitoraggio continuo delle PD nei sistemi elettrici in AC⁴².

Lo strumento permette di visualizzare i risultati di misurazione sia attraverso forme d'onda, sia attraverso lo spettro delle frequenze e viene applicato per installazioni online temporanea o permanente.

Viene integrato nella piattaforma cloud PRY-CAM e offre diverse modalità di connessione dei dati per la telecomunicazione e l'accesso.

Non c'è presenza di connessione galvanica, viene utilizzato contemporaneamente con il sensore PRY-CAM WINGS e offre un consumo energetico molto basso inferiore a 5W.

Il PRY-CAM GRIDS offre un monitoraggio continuo di sistemi come giunti, cavi, trasformatori, quadri e macchine rotanti e la trasmissione dei dati via cavo abbinata all'installazione fissa riduce le necessità di manodopera diretta per le misure.

⁴² Fonte: https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/02_scheda_GRIDS.pdf

I sistemi di allarme e avvisi caratterizzanti lo strumento sono basati su un algoritmo di analisi ad intelligenza artificiale ed esegue la diagnosi remota di PD su richiesta degli esperti.

Grazie alla sua struttura è facile da installare nei sistemi elettrici esistenti e le capacità di diagnosi dello strumento può essere usata sia in AT che MT.

E' adatto per qualsiasi sistema di cavi di alimentazione con soglie di tensione che vanno dai 3 kV ai 600 kV [Fonte42].



Figura 4.38: [Fonte42]

SPECIFICHE TECNICHE:

Input

PD channels: 3x100 Ohm diff., 1.5Vpp (isolated, overvoltage protected)

Synch channels: 3x1 MOhm, 5V + 1 x line (isolated, overvoltage protected)

Sampling frequency: 200 MS/s

Bandwidth: 100 MHz

Processing: Real-time filtering, ultra-precise timestamp (5 ns)

Repetition rate

Full pulse waveform: Ethernet >10,000 pps, WiFi: >3,000-6,000 pps

Pattern only: Ethernet >50,000 pps, WiFi: >10,000 pps

Interfaces: Ethernet. Option or F.O. (3G/4G optional)

Working modes: Stand alone or instrument or continuous monitoring

Power supply: 110-230 V, 50-60 Hz AC / 12 V DC

Power consumption: < 5 W

Working temperature: From -50 °C to 90 °C

5 CONCLUSIONI

L'analisi delle scariche parziali è molto importante per valutare lo stato del sistema di isolamento di un apparecchio, inoltre permette non solo di salvaguardare lo stato di salute di un componente ma anche di tutto il sistema.

Ho voluto studiare le scariche parziali perché ritengo che sono fenomeni, anche se di piccole entità, che nel tempo possono creare grandi problemi al sistema di trasmissione quindi vanno comunque monitorati e tenuti sotto controllo, inoltre, l'importanza che rivestono le tecniche di misurazione e monitoraggio sono proprio la possibilità di controllare questi tipi di fenomeni.

Come si è visto la tecnologia offre diversi modi di misurare tali fenomeni e differenti strumenti di misura e monitoraggio proprio per la diversità con cui si possono presentare essendo che sono caratterizzate sia da impulsi elettrici che acustici.

I sistemi realizzati per monitorare o misurare le PD sono evoluti nel tempo per permettere di ridurre la presenza di un numero elevato di componenti di misura (generatori ad alta tensione, filtri) in modo da facilitare la realizzazione del sistema stesso comportando però un aumento dei costi di realizzazione dei dispositivi.

L'importanza che riveste l'elettricità sta nell'illuminare la strada, fornire corrente alle abitazioni, quindi dare luce al mondo e per permettere di mantenerla bisogna non sottovalutare nulla quindi bisogna cercare di garantire la sicurezza del sistema elettrico attraverso l'evoluzione della tecnologia per ridurre la presenza di fenomeni aleatori come le scariche parziali o almeno cercare di attenuarli.

L'Ingegneria Elettrica riveste grande importanza nel mondo proprio perché deve essere in grado di sviluppare nuove tecnologie che permettano di garantire un futuro sereno non solo per noi ma anche per le generazioni future essendo che, con i problemi che abbiamo causato attraverso l'inquinamento, se abbiamo cambiato noi il pianeta possiamo ricambiarlo di nuovo.

6 RINGRAZIAMENTI

Questi anni di università sono stati bellissimi, è stata un'esperienza veramente emozionante e ho conosciuto un sacco di ragazzi e ragazze e mi sono fatto una compagnia universitaria grazie a questa esperienza, sicuramente non la dimenticherò mai.

Mi mancherà tanto andare a studiare nelle aule studio, frequentare le lezioni, fare il mercoledì universitario, ma ormai devo andare avanti provare nuove esperienze e non vedo l'ora di applicare quello che ho studiato direttamente sul campo anche se non sarà facile.

Ringrazio molto i miei amici che sono sempre rimasti con me, la mia famiglia, sia per il sostegno economico e sia perché non ha mai smesso di credere in me anche quando nei primi anni di Università avevo passato pochi esami.

L'Università ti rende autonomo, ti lascia libero di fare le tue scelte, anche se non è un lavoro alla fine ci aiuta a gestire il nostro tempo, avere un proprio metodo di studio, affrontare gli esami, valutare la nostra preparazione.

L'Ingegneria è una facoltà bellissima, mi ha aiutato a capire come funzionano le cose, a capire che con la nostra intelligenza possiamo arrivare lontano, affrontare la vita con le nostre capacità.

Quello che devo ringraziare più di tutti è me stesso perché ho sempre creduto in me anche in situazioni difficili che ho passato, migliorare le mie capacità, essere utile al mondo, essere all'altezza della vita sono le mie richieste nella vita, ora mi tufferò nel mondo lavorativo e cercherò di mantenere alto questi ideali.

Diventare Ingegnere è una responsabilità, la gente pretenderà da me come giusto che sia, ho scelto di diventare Ingegnere Elettrico perché mi sono appassionato dell'elettricità dalle superiori e poi perché mi piace il fatto di illuminare e dare luce alle cose, cercherò di mantenere alto anche questo titolo che mi spetta migliorando me e il mondo.

